

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dihitung secara matematis pengaruh adanya gelombang berjalan dalam hal ini sambaran petir kemudian akan dihitung jarak ideal penempatan arrester terhadap transformator berdasarkan data dilapangan dan membandingkan dengan standard IEC (1958) dan PLN (1978:4). Setelah itu, akan dilakukan simulasi menggunakan *software* ATP (*Analysis Transient Programme*) dengan memberikan beberapa asumsi, yaitu perubahan jarak arrester terhadap transformator dari jarak yang ada dilapangan serta perubahan durasi waktu sambaran petir pada SUTT Gardu Induk Bantul 150 kV. Berikut adalah gambar dari jarak penempatan arrester dan transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV.



Gambar 4.1 Jarak penempatan arrester dan transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV
(sumber: GI Bantul 150 kV)

1.1 Perhitungan Tegangan Dasar Arrester

Perhitungan tegangan dasar arrester dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$E_r = \alpha \beta U_m$$

Keterangan:

E_r = Tegangan dasar arrester (kV)

α = Koefisien pembumian (0.8)

β = Toleransi guna memperhitungkan fluktuasi tegangan dan efek ferranti (1.2)

U_m = 150 kV (Tegangan sistem maksimum di Gardu Induk Bantul)

Sehingga,

$$E_r = 0.8 \times 1.2 \times 150 \text{ kV}$$

$$E_r = 144 \text{ kV}$$

Dari perhitungan diatas, maka diperoleh tegangan dasar arrester terhadap transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah 144 kV.

1.2 Jarak Ideal Arrester dan Transformator Menurut IEC (1958) dan SPLN (1978:4)

Perhitungan jarak ideal arrester dan transformator tenaga menurut standar IEC (1958) dan PLN (1978:4) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$E_p = E_a + 2 A \frac{S}{v}$$

Dengan nilai:

E_p = 650 kV (Tegangan jepitan transformator GITET / SPLN7, 1978:4)

E_a = 460 kV (Tegangan percikan arrester GITET/ SPLN7, 1978:4)

A = 1000 kV/ μ s (Rekomendasi IEC, 1958 *Recommendation for Lightning Arrester*, 99)

v = 300 m/ μ s (Kecepatan cahaya)

Sehingga,

$$650 = 460 + 2 \times 1000 \frac{S}{300}$$

$$S = \frac{(650 - 460) 300}{2 \times 1000}$$

$$S = 28,5 \text{ m}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka diperoleh jarak ideal dalam penempatan arrester dan transformator tenaga pada gardu induk tegangan ekstra tinggi (GITET) sebesar 28.5 meter (menurut IEC 1958 dan SPLN 1978:4).

1.3 Jarak Ideal Arrester dan Transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV

Dengan menerapkan persamaan dari standard IEC (1958) dan SPLN (1978:4), maka jarak ideal arrester dan transformator tenaga di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah sebagai berikut.

$$E_p = E_a + 2A \frac{S}{v}$$

Dengan nilai:

- Ep = 165 kV (Tegangan jepitan Tap I transformator II GI Bantul 150 kV)
 Ea = 144 kV (Tegangan percikan arrester transformator II GI Bantul 150 kV)
 A = 1000 kV/ μ s (Rekomendasi IEC, 1958 *Recommendation for Lightning Arrester*, 99)
 v = 300 m/ μ s (Kecepatan cahaya)

$$165 = 144 + 2 \times 1000 \frac{S}{300}$$

$$S = \frac{(165 - 144) 300}{2 \times 1000}$$

$$S = 3.15 \text{ m}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka diperoleh jarak ideal antara arrester dan transformator II di Gardu Induk Bantul 150 kV sebesar 3.15 meter.

1.4 Perhitungan Nilai Impedansi (Z) di Beban (Load)

Perhitungan nilai impedansi (Z) di beban dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$Z = \frac{V^2}{S}$$

Keterangan:

V = Tegangan disisi sekunder transformator (kV)

(Tegangan disisi skunder transformator II GI Bantul adalah 20 kV)

S = Daya semu transformator (VA)

(Daya semu pada transformator II GI Bantul adalah 60 MVA)

Z = Impedansi transformator (Ω)

Maka, berdasarkan data diatas diperoleh nilai impedansi beban (*load*) di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah:

$$Z = \frac{20^2 \text{ kV}}{60 \text{ MVA}}$$

$$Z = \frac{400 \text{ kV}}{60000 \text{ kVA}}$$

$$Z = 0,0067 \text{ k}\Omega$$

Sehingga berdasarkan data impedansi (Z) yang telah diperoleh, maka dapat ditentukan nilai resistansi (R) dan induktansi (L) dengan asumsi pf (*factor daya*) $\theta = 0.8$ adalah sebagai berikut.

$$\text{arc cos } \theta$$

$$\text{arc cos } 0.8 = 36.86^\circ$$

$$Z = 0.0067 \angle 36.86^\circ$$

$$Z = R + j X_L$$

$$R = 0.0067 \cos 36.86^\circ$$

$$R = 0.0053 \text{ ohm}$$

$$X_L = 0.0067 \sin 36.86^\circ$$

$$X_L = 0.0040 \text{ H}$$

1.5 Perhitungan Nilai Impedansi (Z) di Jepitan Primer Transformator

Perhitungan nilai impedansi (Z) di jepitan (*bushing*) transformator primer dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$Z = \frac{V^2}{S}$$

Keterangan:

V = Tegangan disisi primer transformator (kV)

(Tegangan disisi primer transformator II GI Bantul adalah 165 kV)

S = Daya semu transformator (VA)

(Daya semu pada transformator II GI Bantul adalah 36 MVA)

Z = Impedansi transformator (Ω)

Maka, berdasarkan data diatas diperoleh nilai impedansi jepitan (*bushing*) transformator primer di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah

$$Z = \frac{165^2 \text{ kV}}{36 \text{ MVA}}$$

$$Z = \frac{27225 \text{ kV}}{1296 \text{ kVA}}$$

$$Z = 21.006 \text{ k}\Omega$$

Sehingga berdasarkan data impedansi (Z) yang telah diperoleh, maka dapat ditentukan nilai resistansi (R) dan induktansi (L) dengan asumsi pf (*factor daya*) $\theta = 0.8$ adalah sebagai berikut.

$$\text{arc cos } \theta$$

$$\text{arc cos } 0.8 = 36.86^\circ$$

$$Z = 21.006 \angle 36.86^\circ$$

$$Z = R + j X_L$$

$$R = 21.006 \cos 36.86^\circ$$

$$R = 16.80 \text{ ohm}$$

$$X_L = 21.006 \sin 36.86^\circ$$

$$X_L = 12.60 \text{ H}$$

1.6 Nilai Induktansi (L) dan Kapasitansi (C) Kawat Konduktor SUTT (antar tower 150 kV) dan Switchyard di Gardu Induk Bantul 150 kV

Perhitungan nilai induktansi (L) dan kapasitansi (C) pada menara saluran transmisi (*tower*) dan *switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV dapat diperoleh dari perhitungan berikut ini.

1.6.1 Nilai Induktansi (L)

Saat $h_{tower} = 15 \text{ m}$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2h}{r}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2 \times 15}{0.013}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 2307.69$$

$$L = 14.74 \times 10^{-4} \text{ mH}$$

Saat $h_{switchyard} = 10 \text{ m}$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2h}{r}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{2 \times 10}{0.013}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 7.33$$

$$L = 14.67 \times 10^{-4} \text{ mH}$$

1.6.2 Nilai Kapasitansi (C)

Saat $h_{tower} = 15 \text{ m}$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2 \times 15}{0.013}}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 7.74}$$

$$C = 2.714 \times 10^{-5} \mu\text{F}$$

Saat $h_{switchyard} = 10 \text{ m}$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2h}{r}}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \frac{2 \times 10}{0.013}}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 7.33}$$

$$C = 7.570 \times 10^{-6} \mu\text{F}$$

1.7 Impedansi Surja di *Tower* SUTT dan *Switchyard* di Gardu Induk Bantul 150 kV

Perhitungan impedansi surja di menara saluran transmisi (*tower*) dan *switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV dapat diperoleh dari persamaan berikut ini.

$$Z = \sqrt{L/C} = 60 \ln (2 h/r)$$

Sehingga, berdasarkan persamaan diatas diperoleh nilai impedansi surja SUTT 150 kV antar menara (*tower*) adalah sebagai berikut.

$$Z = 60 \ln (2^{15\text{m}}/0.013\text{m})$$

$$Z = 60 \ln (2307.69)$$

$$Z = 464.64 \Omega$$

Sedangkan untuk nilai impedansi di *switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV diperoleh nilai sebagai berikut.

$$Z = 60 \ln (2^{10\text{m}}/0.013\text{m})$$

$$Z = 60 \ln (1538.46)$$

$$Z = 440.31 \Omega$$

Keterangan umum:

- r = Jari-jari kawat konduktor (0.013 m)
 Gardu Induk Bantul 150 kV menggunakan kawat konduktor atau saluran udara berjenis ACSR “*Aluminium Cable Steel Reinforced*” dengan luas penampang 550 mm²
- $htower$ = Tinggi kawat konduktor (R,S,T) diatas tanah (15 m) Tinggi kawat fasa konduktor antar menara (*tower*) SUTT 150 kV dilihat dari permukaan tanah tanpa kawat tanah (ideal)
- $hswitchyard$ = Tinggi kawat konduktor diatas tanah (10 m)
 Tinggi kawat fasa konduktor (R S T) di *switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV dilihat dari permukaan tanah tanpa kawat tanah

1.8 Perhitungan Arus Pelepasan Arrester pada Transformator II di *Switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV

Perhitungan arus pelepasan arrester pada transformator di *switchyard* Gardu Induk Bantul 150 kV dapat diperoleh dari perhitungan berikut ini.

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{Z}$$

Keterangan:

- I_a = Arus pelepasan arrester (kA)
 U_d = Tegangan gelombang datang (kV) diasumsikan sebesar 200 kV
 U_A = Tegangan kerja arrester/tegangan sisa (144 kV)
 Z = Impedansi surja (Ω)

Maka, dari data tersebut diperoleh perhitungan arus pelepasan arrester pada transformator II di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah:

$$I_a = \frac{2 \times 200 \text{ kV} - 144 \text{ kV}}{440.31}$$

$$I_a = \frac{256}{440.31}$$

$$I_a = 0.581 \text{ kA}$$

1.9 Perhitungan Tegangan Surja Menurut SPLN 7. 1987

Penghitungan tegangan surja dengan asumsi tegangan sambaran petir sebesar 200 kV/ μ s (e_1) pada sisi jumper antara arrester dan transformator. Besarnya tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (e_2) menurut (SPLN 7. 1987) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$e_2 = \frac{2z_{p1}}{z_{p1} + z_2} e_1$$

$$e_2 = \frac{2 \times 43,4775}{43,4775 + 47,8231} \times 200$$

$$e_2 = 190.4762 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Keterangan:

e_2 = Tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (kV)

e_1 = Tegangan surja sambaran petir (kV)

Tegangan surja diasumsikan sebesar 200 kV/ μ s

Z_{p1} = Impedansi transformator primer (Ω)

Impedansi transformator primer 43,4775 Ω

Z_2 = Impedansi transformator sekunder (Ω)

Impedansi transformator sekunder 47,8231 Ω

1.10 Perhitungan Tegangan Sambaran Petir pada Transformator II di Gardu Induk Bantul 150 kV

Perhitungan tegangan sambaran petir maksimal pada transformator II di Gardu Induk Bantul 150 kV dengan asumsi sambaran petir 200 kV/ μ s menggunakan persamaan dari SPLN 7.1987 adalah sebagai berikut.

$$e_2 = \frac{2z_{p1}}{z_{p1} + z_2} e_1$$

$$e_2 = \frac{2 \times 21,011.1}{21,011.1 + 2,546.8} \times 200$$

$$e_2 = 356.75 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Keterangan:

- e_2 = Tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (kV)
(simpangan kawat arrester dan kawat fasa (R, S, atau T))
- e_1 = Tegangan surja sambaran petir (200 kV/ μ s) menurut SPLN 7. 1987
- Z_{p1} = Impedansi transformator primer (21011.1 Ω)
- Z_2 = Impedansi transformator sekunder (2546.8 Ω)

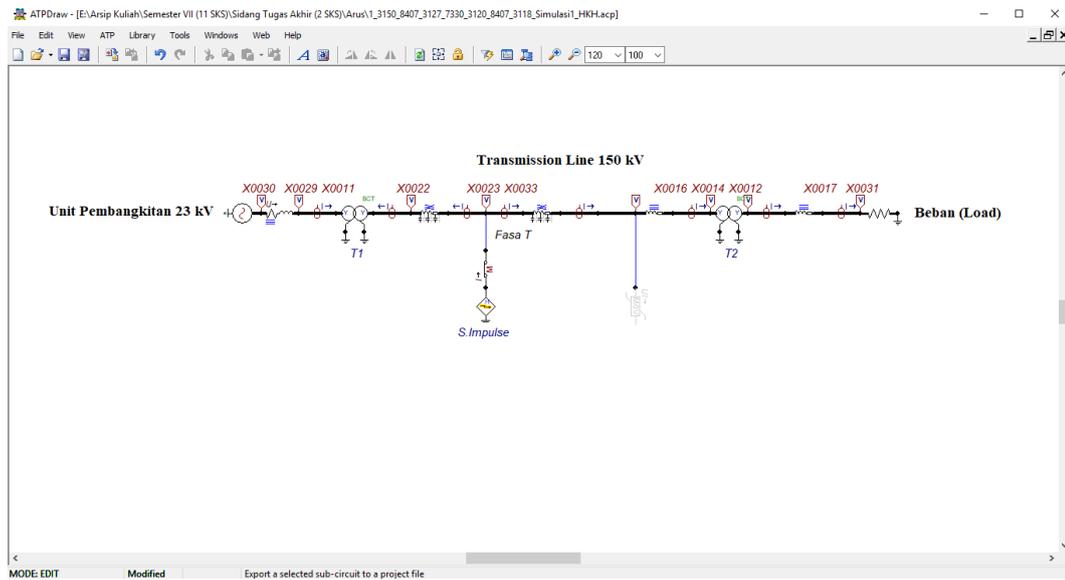
1.11 Pembahasan Hasil Simulasi ATP (*Analysis Transient Programme*)

Pada studi ini terdapat dua kondisi berbeda yang akan dianalisis yaitu, kondisi ketika sistem tidak terpasang arrester dan kondisi ketika sistem terpasang arrester jenis *metal oxide varistor* (MOV). Pada kondisi pertama akan dijelaskan tiga skenario gelombang sambaran petir (*surge impulse*) yang terjadi, yaitu titik sambaran petir, titik jepitan transformator primer dan titik beban (*load*). Sedangkan pada kondisi kedua terdapat skenario yang hampir sama seperti kondisi pertama, namun ada penambahan satu skenario baru yaitu menempatkan arrester pada sistem dengan dua asumsi jarak (jarak nyata dilapangan Gardu Induk Bantul 150 kV dan jarak analisis perhitungan berdasarkan standar IEC 1958 dan SPLN 1978:4). Tujuan dari penempatan arrester dan transformator dari kedua jarak tersebut agar diperoleh jarak ideal berdasarkan jumlah *impulse* dan tegangan yang terjadi pada jepitan transformator bagian primer dengan simulasi ATP *Draw*. Adapun asumsi umum dari kedua kondisi tersebut adalah sebagai berikut:

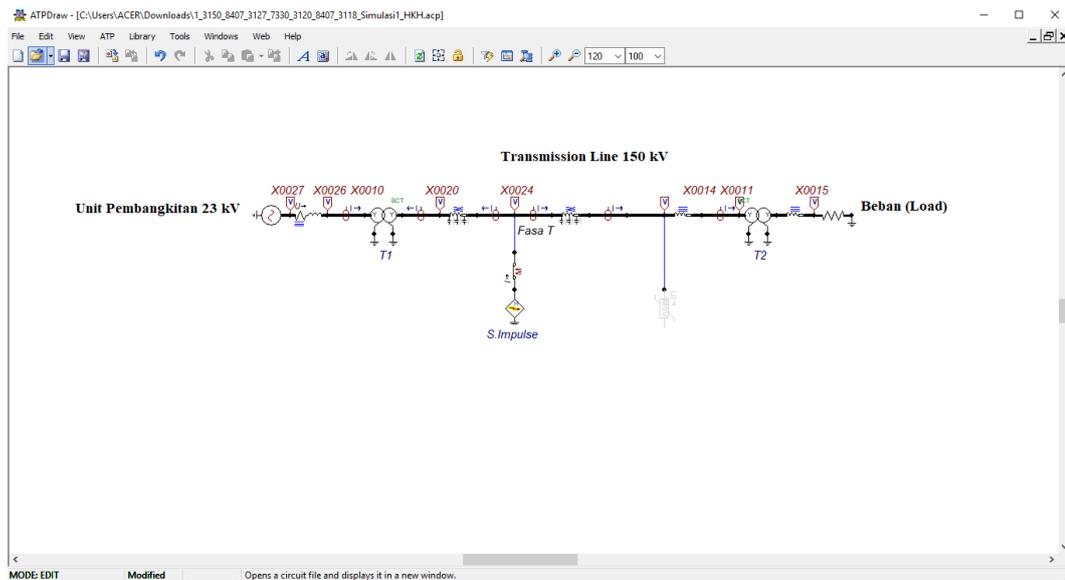
1. Sambaran petir (*surge impulse*) akan menyentuh salah satu fasa (R, S atau T) dari saluran transmisi dan terhubung langsung secara serial dengan transformator II bagian primer 150/20 kV di Gardu Induk Bantul.
2. Jarak sambaran petir dan objek atau peralatan yang akan dilindungi (transformator) adalah 1 km dari titik sambaran petir (*lightning strike*).
3. Intensitas tegangan *impulse* dari sambaran petir yang diberikan adalah 776 kV berdasarkan parameter arrester yang digunakan (sumber: *Insulation withstand voltages IEEE C62.11-2012*)

1.11.1 Skenario Sistem Tanpa Arrester MOV

Pada skenario ini akan disusun sebuah rangkaian sistem tenaga listrik yang masing-masing terdiri dari sumber/unit pembangkitan (generator 23 kV dan RLC 3 fasa), transformator *step up* (23/150 kV), saluran transmisi (panjang total 31 km), transformator *step down* (150/20 kV), saluran distribusi (panjang 1 km) dan beban (*load*). Berikut adalah gambar dari rangkaian simulasi arus dan tegangan terhadap waktu akibat sambaran petir tanpa perlindungan arrester (*metal oxide arrester*) menggunakan *software* ATP (*Analysis Transient Programme*).



Gambar 4.2 Rangkaian simulasi arus terhadap waktu akibat sambaran petir tanpa perlindungan arrester
(sumber: *Software ATP*)

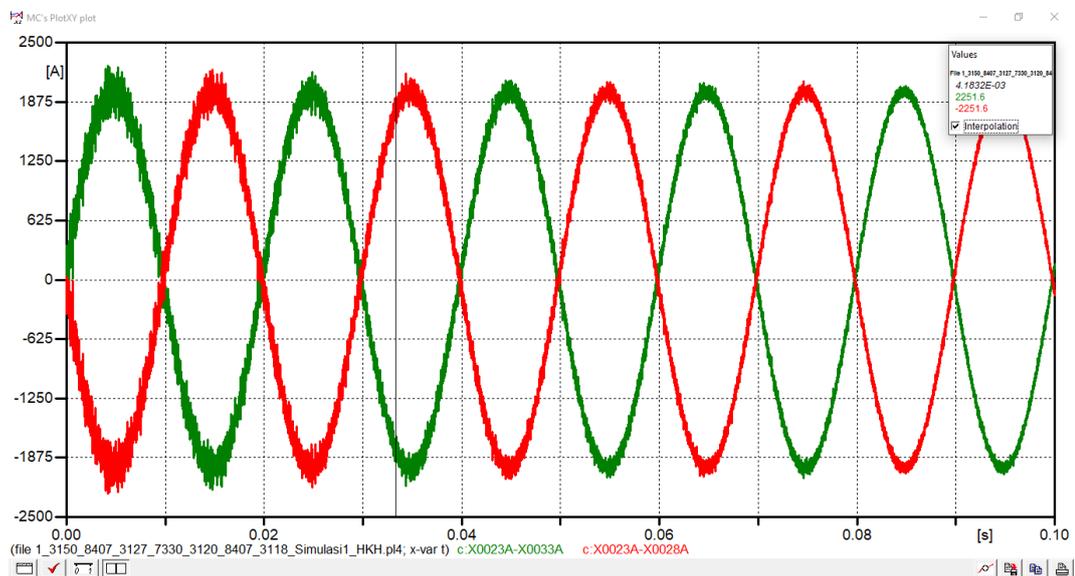


Gambar 4.3 Rangkaian simulasi tegangan terhadap waktu akibat sambaran petir tanpa perlindungan arrester
(sumber: *Software ATP*)

1.11.1.1 Kondisi Dtitik Sambaran Petir

a. Arus Terhadap Waktu

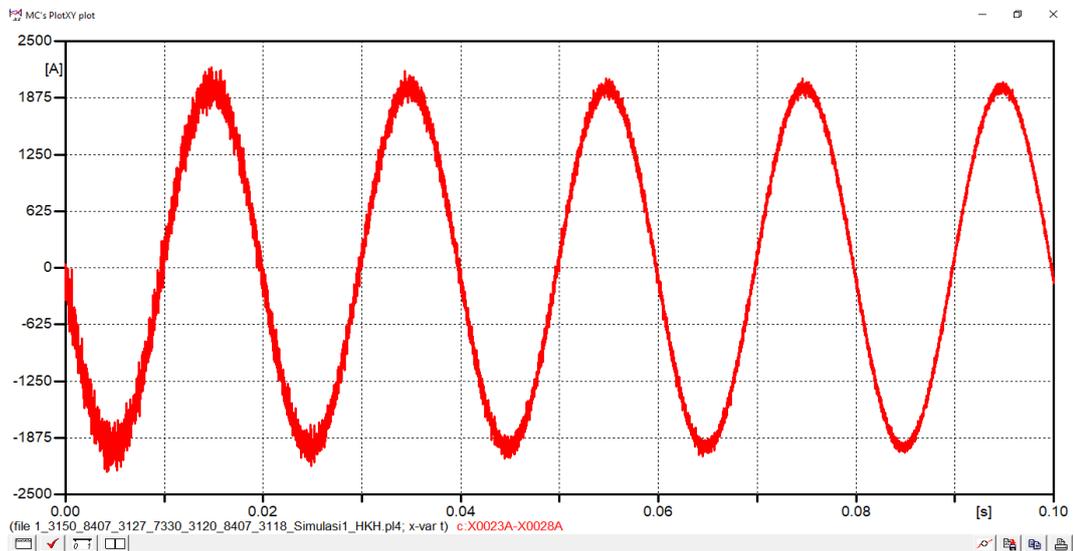
Besarnya arus dititik sambaran petir akan mengalir ke dua arah (*upstream* dan *downstream*), yaitu bagian pertama (*upstream*) bergerak menuju sumber/unit pembangkitan (transformator 23/150 kV). Sedangkan untuk bagian kedua (*downstream*) bergerak menuju transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV. Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu di fasa T dari kondisi *upstream* (c:X0023A-X0028A) dan *downstream* (c:X0023A-X0033A) pada saluran transmisi 150 kV



Gambar 4.4 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir (*upstream* dan *downstream*)

(sumber: *Software ATP*)

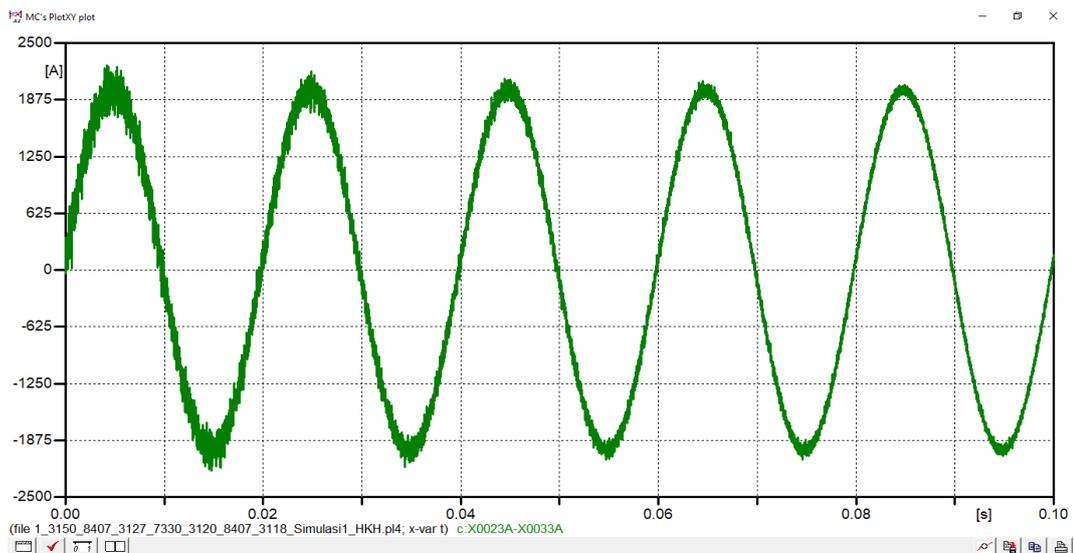
Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir yang menuju sumber/unit pembangkitan (*upstream*) pada titik (c:X0023A-X0028A).



Gambar 4.5 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir (*upstream*)

(sumber: *Software ATP*)

Adapun gambar gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir yang menuju Gardu Induk Bantul 150 kV (*downstream*) pada titik (c:X0023A-X0033A) adalah sebagai berikut.



Gambar 4.6 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir (*downstream*)

(sumber: *Software ATP*)

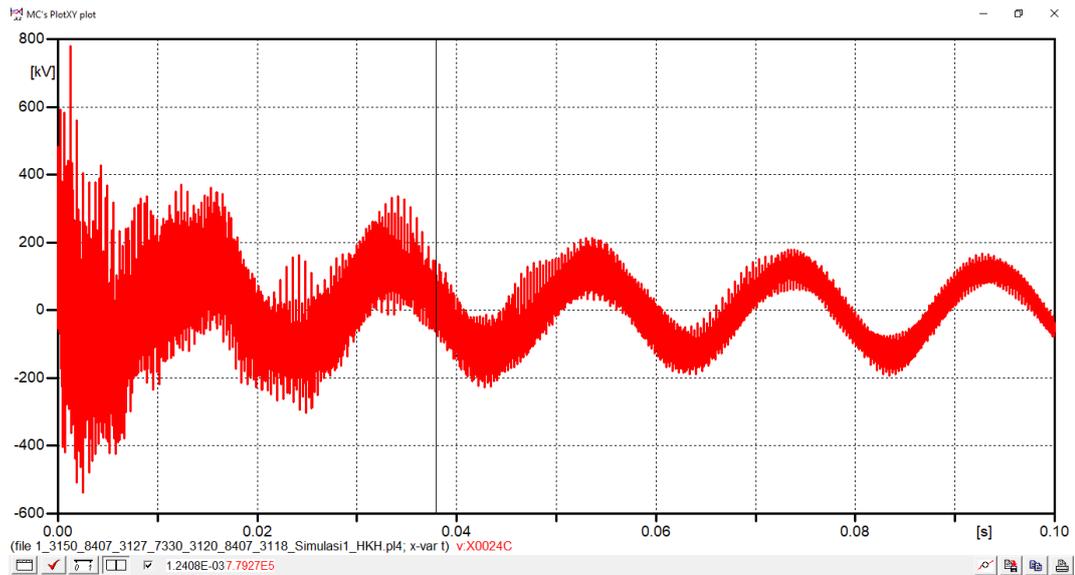
Berdasarkan gambar 4.4 diatas terlihat bahwa puncak nilai arus dititik sambaran petir menuju Gardu Induk Bantul 150 kV (*downstream*) dan unit pembangkitan (*upstream*) saat waktu muka petir 4.1883 ms adalah 2729.8 ampere. Berikut adalah tabel perbandingan puncak gelombang arus terhadap waktu pada *upstream* dan *downstream* dititik sambaran petir selama 0.1 detik.

Tabel 4.1 Perbandingan arus terhadap waktu dititik sambaran petir
(*upstream* dan *downstream*)

Puncak Gelombang	Arus (A)		Waktu (ms)
	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	
1	- 2251.6	2251.6	4.1832
2	- 2189.9	2189.9	0.024879
3	- 2103.1	2103.1	0.044409
4	- 2078.3	2078.3	0.064509
5	- 2044.3	2044.3	0.084896

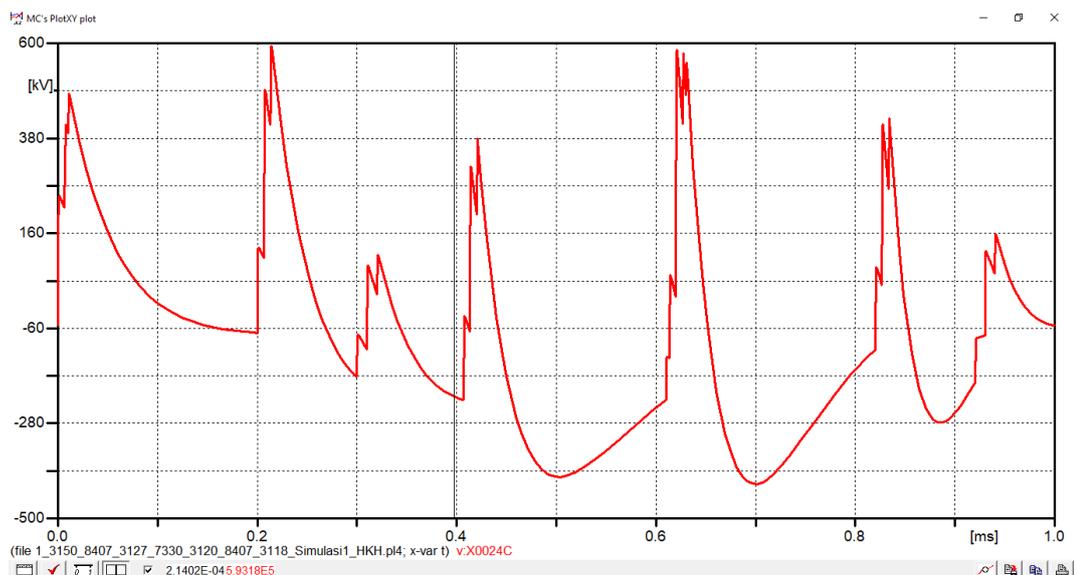
b. Tegangan Terhadap Waktu

Nilai tegangan impuls puncak terhadap waktu dititik sambaran petir pada fasa T (X0024C) adalah 779.27 kV dengan durasi waktu puncak sambaran petir 1.2408 ms. Berikut adalah gambar dari gelombang tegangan sambaran petir terhadap waktu pada fasa T dititik sambaran petir.



Gambar 4.7 Gelombang tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir fasa T

(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.8 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir fasa T

(sumber: *Software ATP*)

Nilai tegangan dititik sambaran petir akan bergerak ke dua arah (*upstream* dan *downstream*), yaitu bagian pertama (*upstream*) bergerak menuju unit pembangkitan (transformator 23/150 kV) dan bagian kedua (*downstream*) bergerak menuju arrester di Gardu Induk Bantul 150 kV. Adapun tabel perbandingan tegangan terhadap waktu secara keseluruhan dari puncak masing-masing tegangan impuls petir dititik sambaran petir yang menuju unit pembangkitan (transformator 23/150 kV) dan Gardu Induk Bantul (transformator 150/20 kV) adalah sebagai berikut.

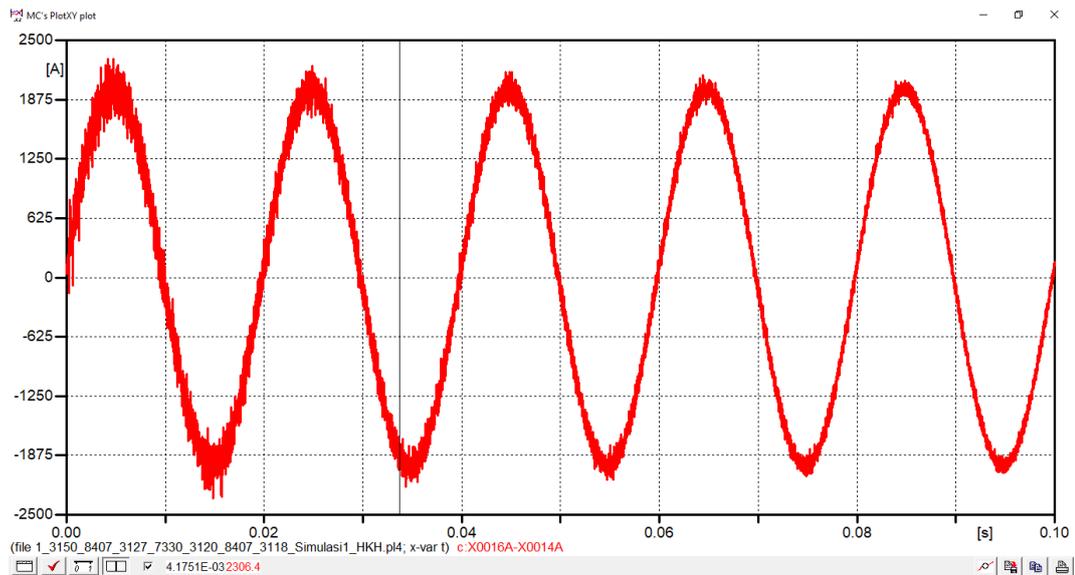
Tabel 4.2 Perbandingan tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir yang menuju ke sumber dan Gardu Induk Bantul 150 kV

Puncak Gelombang	Tegangan (kV)	Waktu (ms)
1	779.27	1.2408
2	371.35	0.012401
3	335.56	0.0341
4	213.57	0.05301
5	179.58	0.073845

1.11.1.2 Kondisi Kedua Pada Jepitan Transformator

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu pada jepitan (*bushing*) transformator bagian primer (c:X0016A-X0014A).



Gambar 4.9 Gelombang arus terhadap waktu pada jepitan transformator primer

(sumber: *Software ATP*)

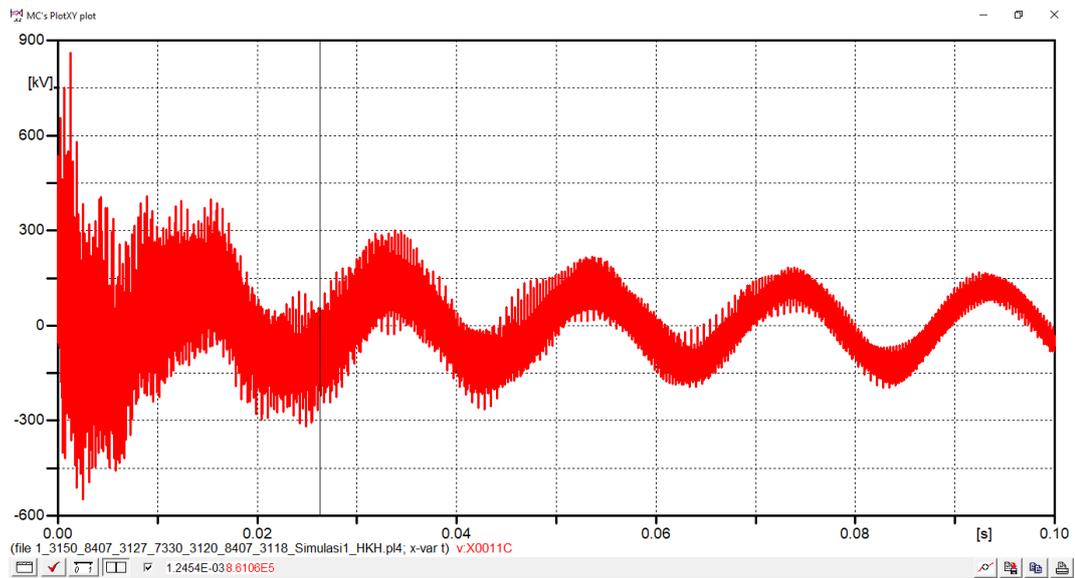
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar gelombang arus terhadap waktu yang terjadi pada jepitan transformator bagian primer akibat sambaran petir dititik (c:X0016A-X0014A) adalah 2306.4 ampere pada saat 4.1750-4.1752 ms.

Tabel 4.3 Perbandingan arus terhadap waktu dijepitan transformator bagian primer

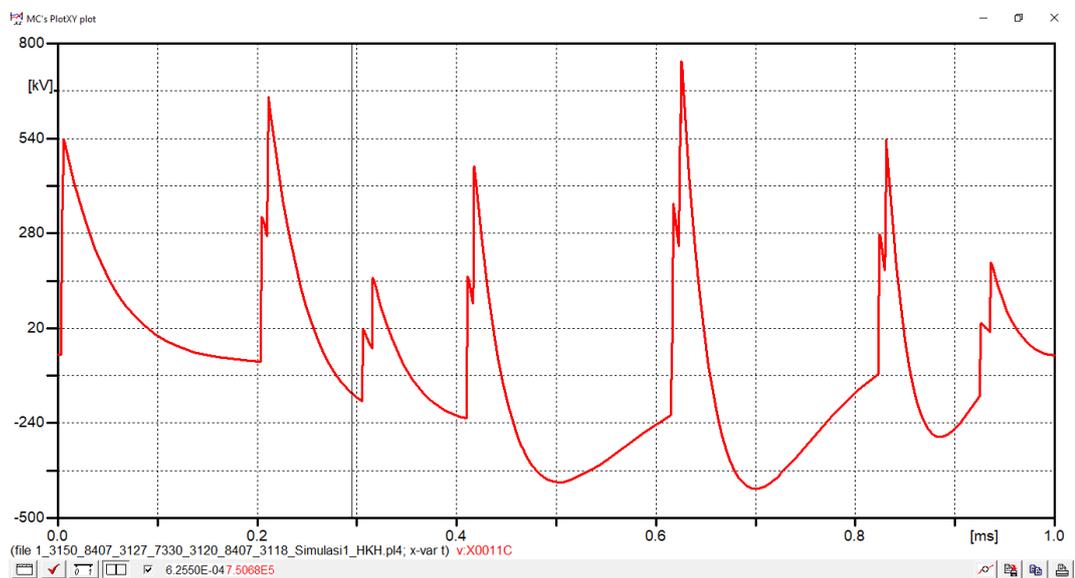
Puncak Gelombang	Arus (A)	Waktu (ms)
1	2306.4	4.1750-4.1752
2	2227	0.024874
3	2169.3	0.044409
4	2131.2	0.064365
5	2075.2	0.084823

b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar gelombang tegangan impulse terhadap waktu akibat sambaran petir pada jepitan (*bushing*) transformator bagian primer (v:X0011C)



Gambar 4.10 Gelombang tegangan terhadap waktu pada jepitan transformator primer
(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.11 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu dijepitan transformator primer fasa T
(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa puncak tegangan impulse gelombang yang terjadi pada jepitan transformator bagian primer akibat sambaran petir saat waktu muka 1.2454 ms adalah petir 861.06 kV. Adapun tabel keseluruhan dari puncak masing-masing tegangan dan impuls petir terhadap waktu muka petir pada jepitan (*bushing*) transformator adalah sebagai berikut.

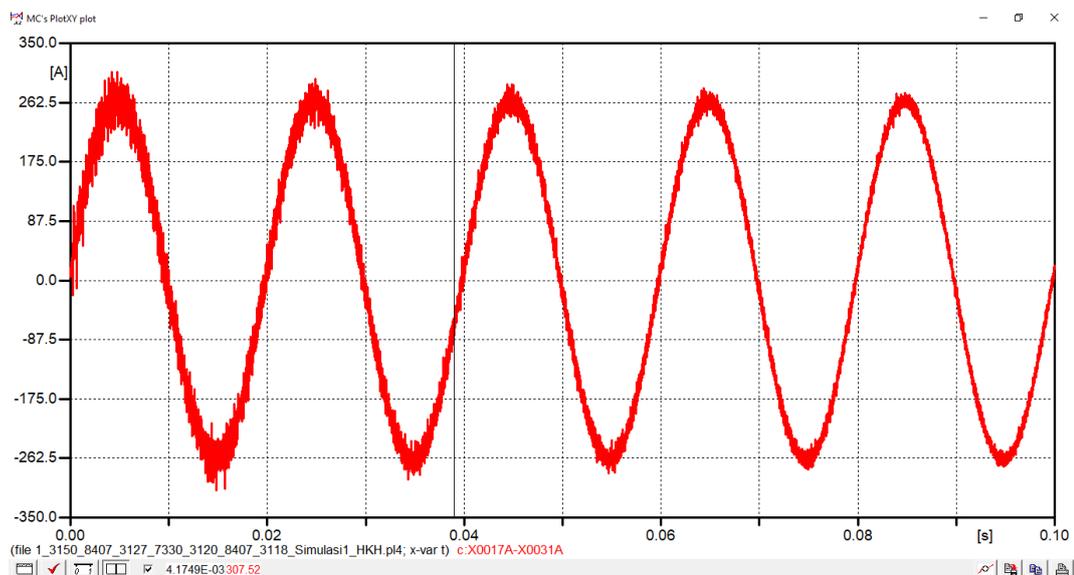
Tabel 4.4 Perbandingan tegangan terhadap waktu dijepitan transformator bagian primer

Puncak Gelombang	Tegangan (kV)	Waktu (ms)
1	861.06	1.2454
2	407.56	8.8841×10^{-3}
3	300.83	0.033785
4	216.68	0.053625
5	184.01	0.073845

1.11.1.3 Kondisi Ketiga Pada Beban (*Load*)

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu akibat sambaran petir pada beban/*load* (c:X0017A-X0031A).



Gambar 4.12 Gelombang arus terhadap waktu pada beban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)

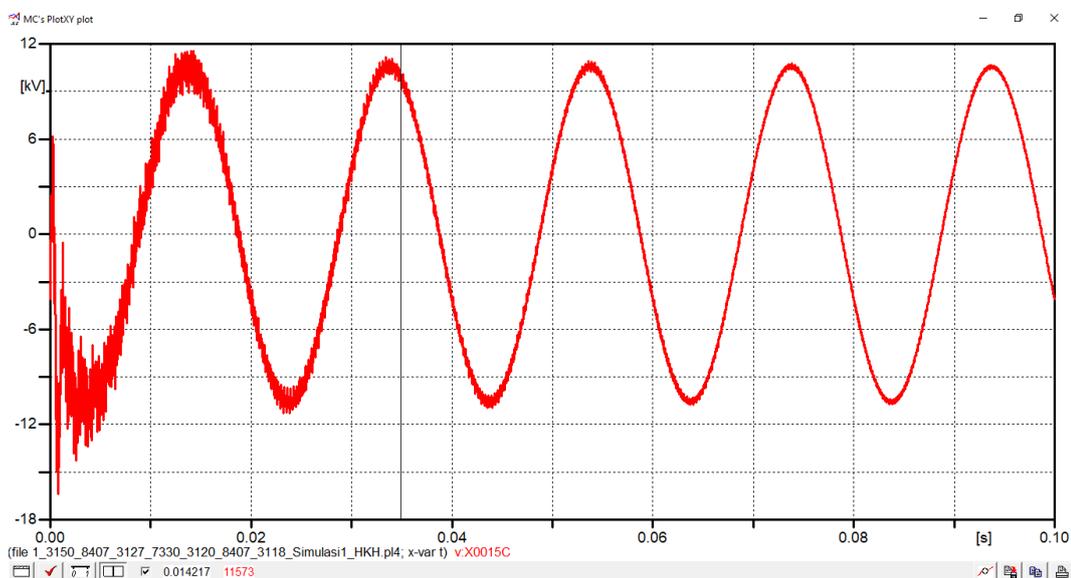
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar arus terhadap waktu yang terjadi pada beban (*load*) akibat sambaran petir adalah 307.52 ampere dengan waktu muka petir 4.1749 ms. Adapun tabel keseluruhan dari puncak masing-masing arus terhadap waktu muka petir pada beban (*load*) atau transformator bagian sekunder adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan arus terhadap waktu dibeban (*load*) transformator sekunder

Puncak Gelombang	Arus (A)	Waktu (ms)
1	307.52	4.1749
2	296.93	0.024874
3	289.24	0.044408
4	284.16	0.064365
5	276.69	0.084823

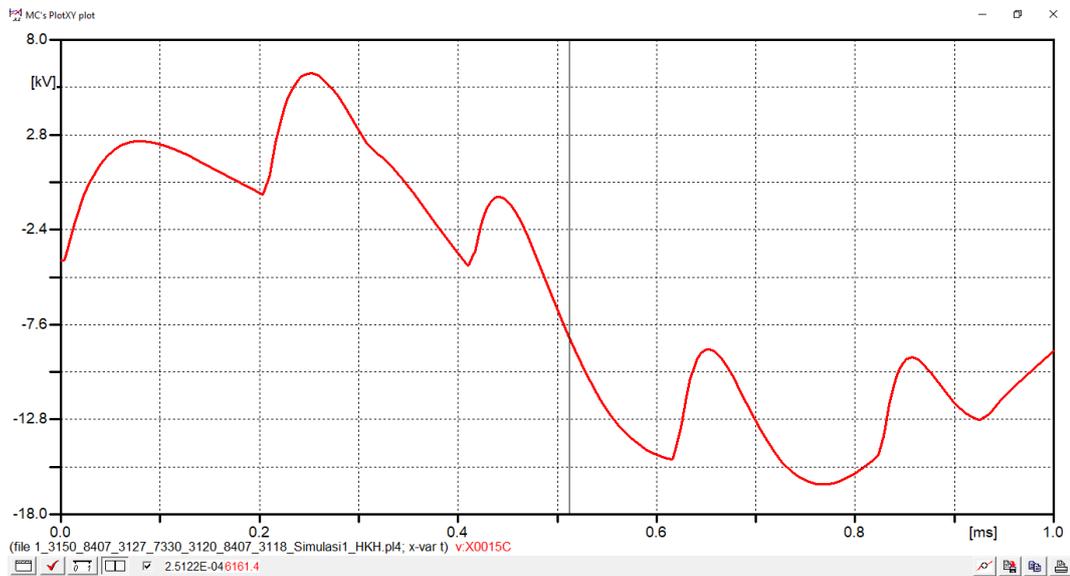
b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar gelombang tegangan terhadap waktu pada beban (*load*) dititik (v:X0015C).



Gambar 4.13 Gelombang tegangan terhadap waktu pada beban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.14 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu di beban (*load*) fasa T
(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa *impulse* tegangan terhadap waktu muka petir yang terjadi pada beban (*load*) akibat sambaran petir adalah 23.642 kV dengan waktu muka petir 2.5136×10^{-4} ms. Adapun tabel keseluruhan dari puncak masing-masing tegangan dan impulse petir terhadap waktu muka petir pada beban (*load*) atau transformator bagian sekunder adalah sebagai berikut.

Tabel 4.6 Perbandingan tegangan terhadap waktu dibeban (*load*)

Puncak Gelombang	Tegangan (kV)	Waktu (ms)
1	11.573	0.014217 s
2	11.169	0.033385
3	10.907	0.053568
4	10.756	0.073857
5	10.675	0.093628

1.11.1.4 Tabel Perbandingan Tegangan dan Arus Saat Sistem Tidak Terpasang Arrester

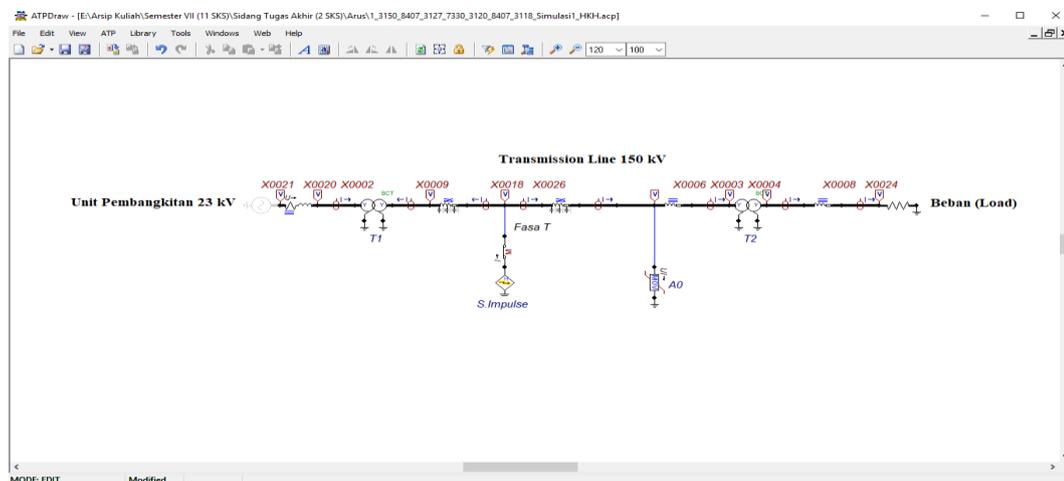
Berikut ini adalah tabel perbandingan besar arus dan tegangan terhadap waktu akibat sambaran petir (*lightning strike*) dari ketiga lokasi titik (*node*) saat sistem tidak terpasang arrester.

Tabel 4.7 Perbandingan tegangan dan arus saat sistem tidak terpasang arrester pada waktu muka petir 0.1 ms

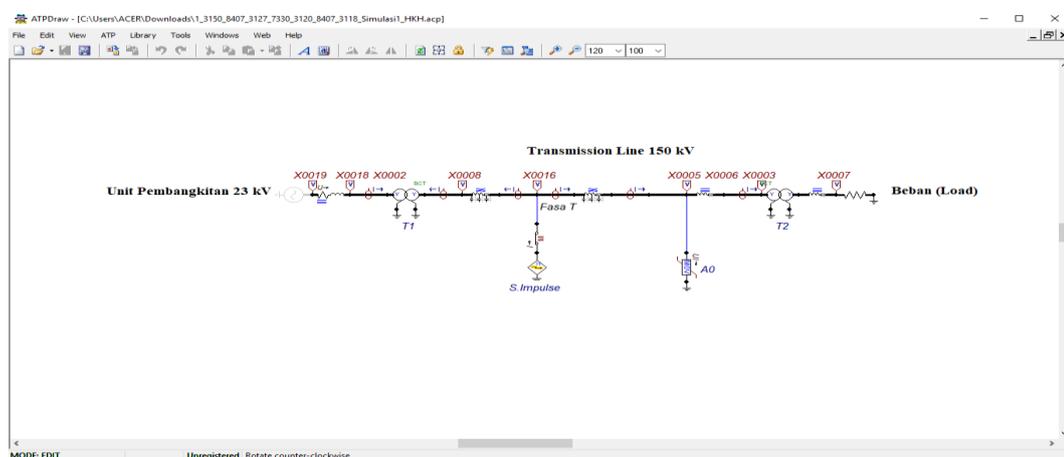
Nilai (Terhadap Waktu)	Tempat		
	Sambaran petir	Trafo Primer	Beban (<i>load</i>)
Tegangan (kV)	779.27	861.06	11.573
Arus (A)	2729.8	2306.4	307.52

1.11.2 Skenario Sistem Dengan Arrester MOV

Pada skenario ini akan disusun sebuah sistem saluran transmisi yang terdiri dari sumber/unit pembangkitan (generator 23 kV), RLC 3 fasa generator, transformator *step up* (23/150 kV), saluran transmisi (panjang total 31 km), transformator *step down* (150/20 kV), saluran distribusi 1 km dan beban (*load*). Namun, sistem ini akan ditambahkan sebuah arrester jenis MOV dengan kapasitas melewati tegangan sebesar 400 kV. Berikut adalah rangkaian simulasi dari skenario sambaran petir (*surge impulse*) dengan perlindungan arrester jenis MOV menggunakan *software ATP (Analysis Transient Programme)*.



Gambar 4.15 Rangkaian simulasi arus lebih dengan perlindungan arrester (*metal oxide varistor*) akibat sambaran petir (sumber: *Software ATP*)

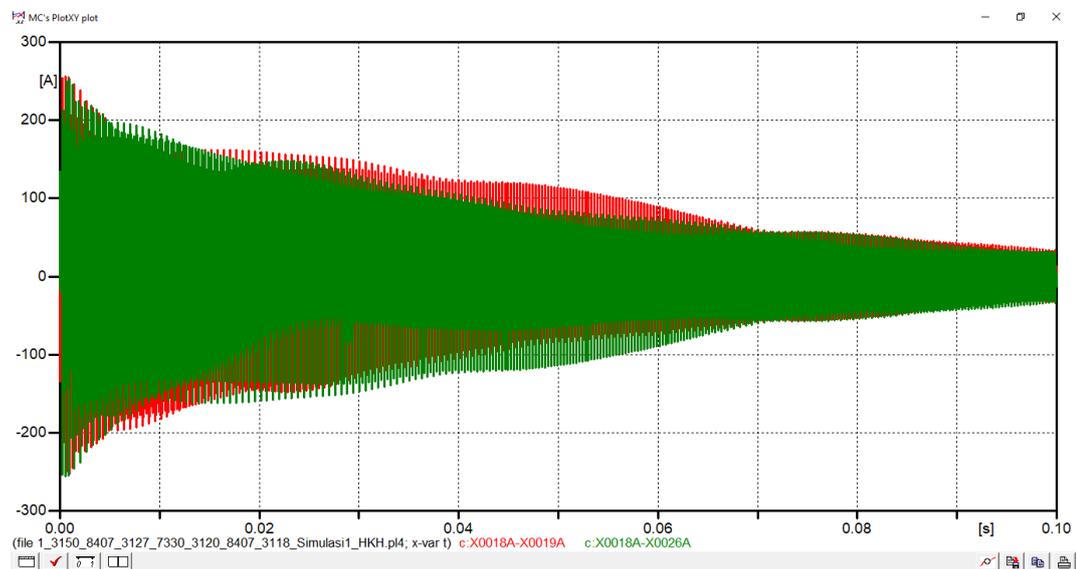


Gambar 4.16 Rangkaian simulasi tegangan lebih dengan perlindungan arrester (*metal oxide varistor*) akibat sambaran petir (sumber: *Software ATP*)

1.11.2.1 Kondisi Pertama Dititik Sambaran Petir

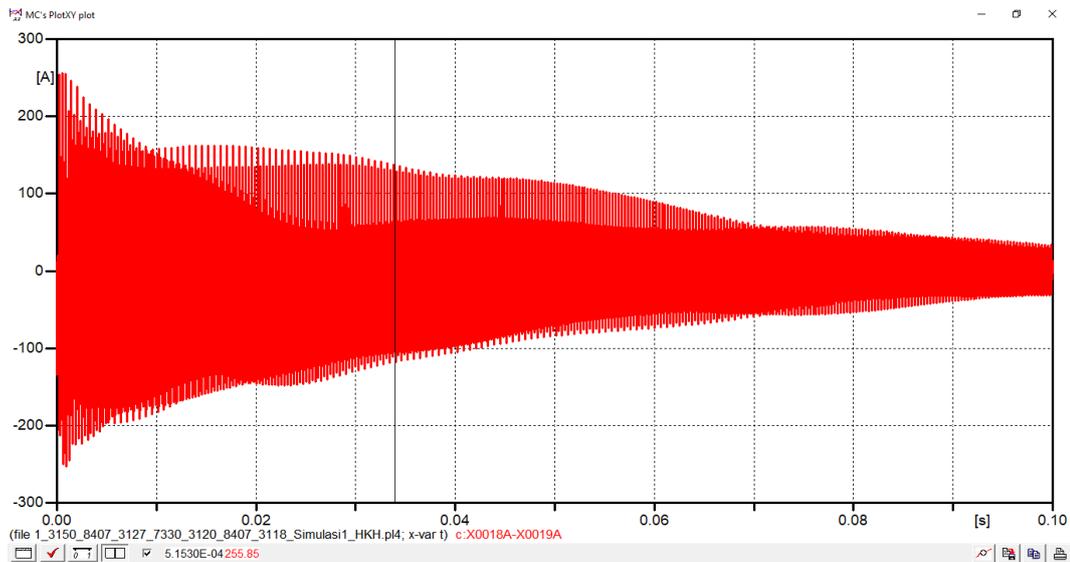
a. Arus Terhadap Waktu

Besarnya arus dititik sambaran petir akan mengalir ke dua arah (*upstream* dan *downstream*), yaitu bagian pertama (*upstream*) bergerak menuju sumber/unit pembangkitan (transformator 23/150 kV). Sedangkan untuk bagian kedua (*downstream*) bergerak menuju transformator di Gardu Induk Bantul 150 kV. Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu di fasa T dari kondisi *upstream* (c:X0018A-X0019A) dan *downstream* (c:X0018A-X0026A) pada saluran transmisi 150 kV.



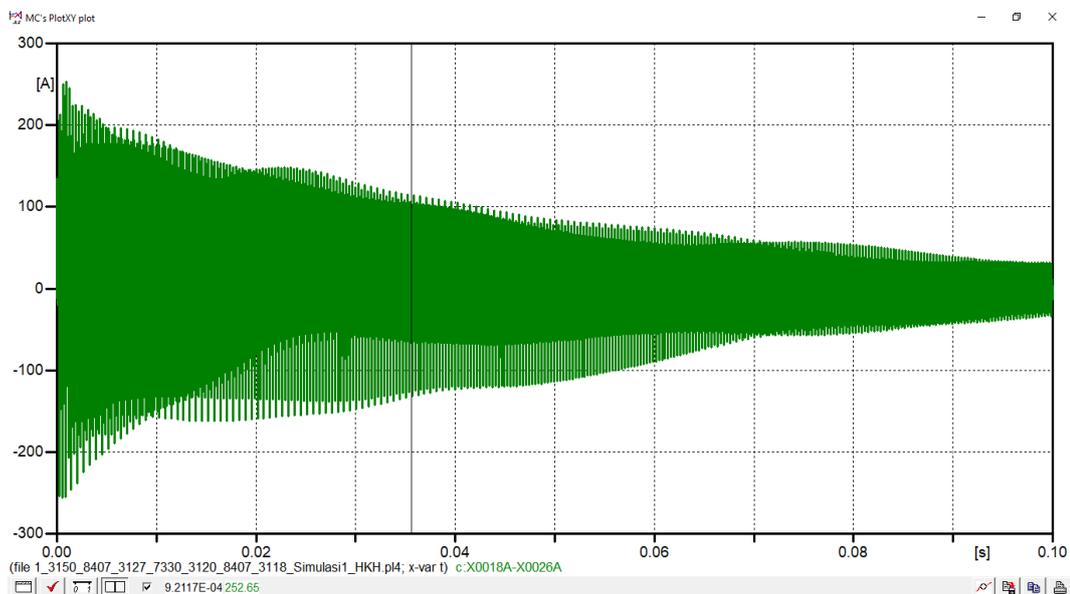
Gambar 4.17 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir *upstream* dan *downstream* dengan pemasangan arrester
(sumber: *Software ATP*)

Berikut adalah gambar gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir yang menuju sumber/unit pembangkitan (*upstream*) pada titik (c:X0018A-X0019A) setelah dipasang arrester adalah sebagai berikut.



Gambar 4.18 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir (*upstream*)
setelah pemasangan arrester
(sumber: *Software ATP*)

Adapun gambar gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir yang menuju gardu induk Bantul/*downstream* (c:X0018A-X0026A) setelah dipasang arrester adalah sebagai berikut.



Gambar 4.19 Gelombang arus terhadap waktu dititik sambaran petir (*downstream*)
setelah pemasangan arrester
(sumber: *Software ATP*)

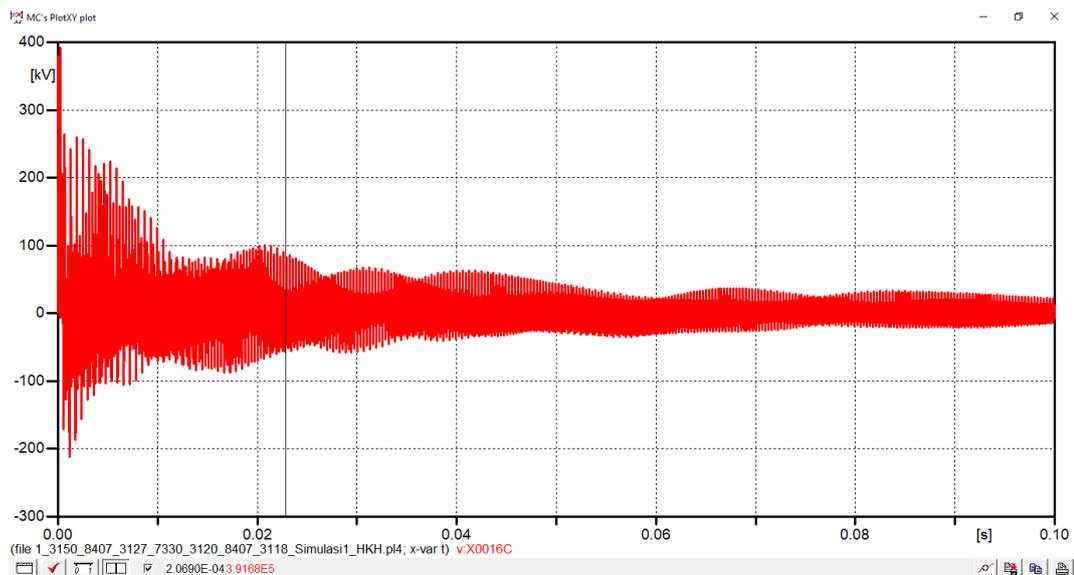
Berdasarkan gambar 4.17 diatas terlihat bahwa puncak nilai arus dititik sambaran petir menuju gardu induk Bantul (*downstream*) dan unit pembangkitan (*upstream*) saat waktu muka petir 5.1530×10^{-4} s adalah 255.85 ampere. Berikut adalah tabel perbandingan arus terhadap waktu pada *upstream* dan *downstream* dititik sambaran petir selama 0.1 detik.

Tabel 4.8 Perbandingan arus terhadap waktu dititik sambaran petir

Puncak Gelombang	Arus (A)		Waktu (ms)
	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	
1	- 255.85	255.85	5.1530×10^{-4} s
2	- 207.71	207.71	4.3309×10^{-3}
3	- 111.95	111.95	0.05115
4	- 56.6	56.6	0.077717
5	- 34.81	34.81	0.09858

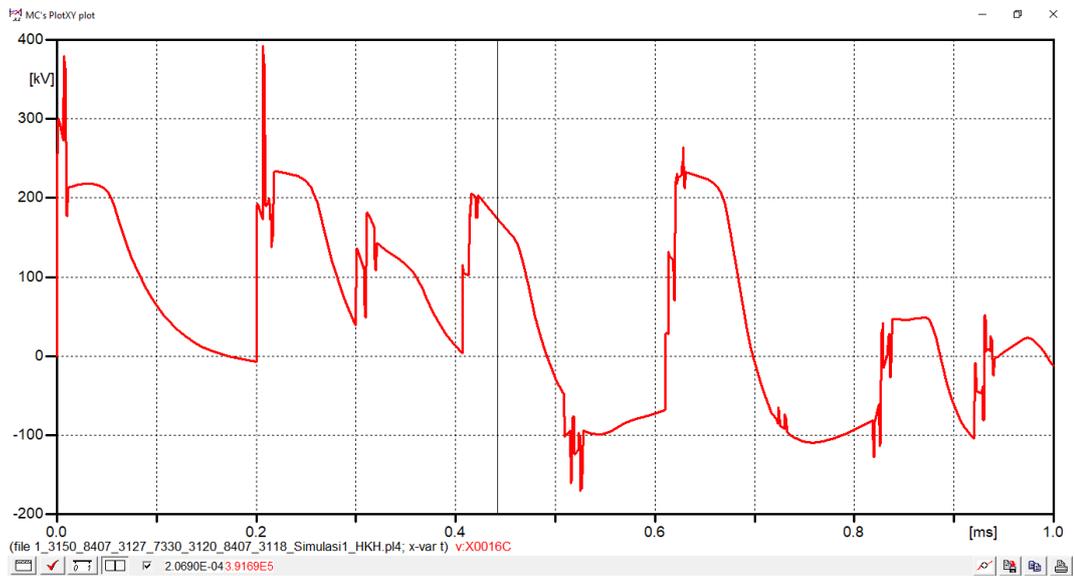
b. Tegangan Terhadap Waktu

Besarnya nilai tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir (X0016C) dengan waktu muka petir 2.0690×10^{-4} ms adalah 391.68 kV.



Gambar 4.20 Gelombang tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir

(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.21 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir
(sumber: *Software ATP*)

Tabel 4.9 Besar impuls tegangan terhadap waktu dititik sambaran petir

Puncak gelombang	Tegangan (kV)	Waktu (ms)
1	391.68	2.0690×10^{-4}
2	223.76	5.2708×10^{-3}
3	100.76	0.020771
4	63.078	0.04122
5	37.145	0.067787

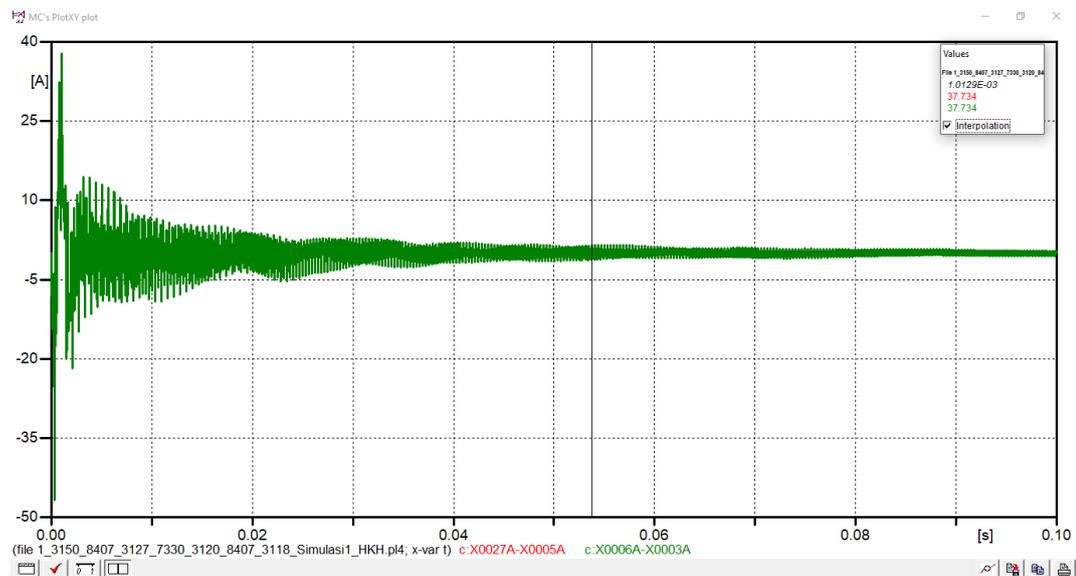
1.11.2.2 Kondisi Kedua di Arrester-Transformator

1. Asumsi Jarak Ideal Arrester dan Transformator 3.15 Meter

Pada skenario ini jarak arrester terhadap transformator adalah 3.15 meter berdasarkan analisis perhitungan standar dari IEC (1958) dan SPLN (1978:4).

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik arus terhadap waktu dititik arrester (c:X0027A-X0005A) dan jepitan transformator (c:X0006A-X0003A).

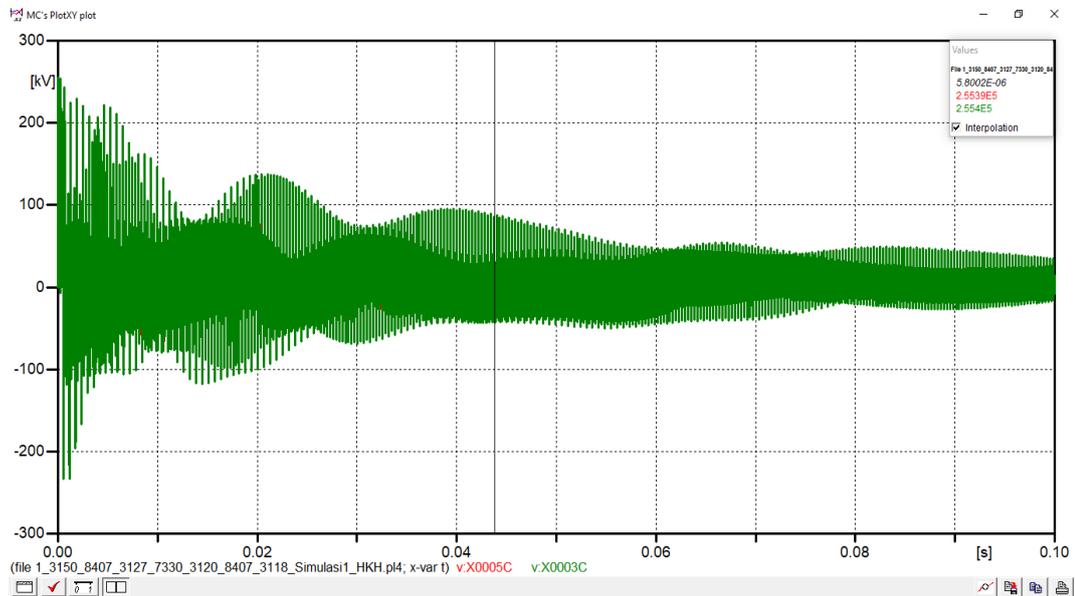


Gambar 4.22 Kondisi gelombang arus terhadap waktu dititik arrester dan jepitan transformator
(sumber: *Software ATP*)

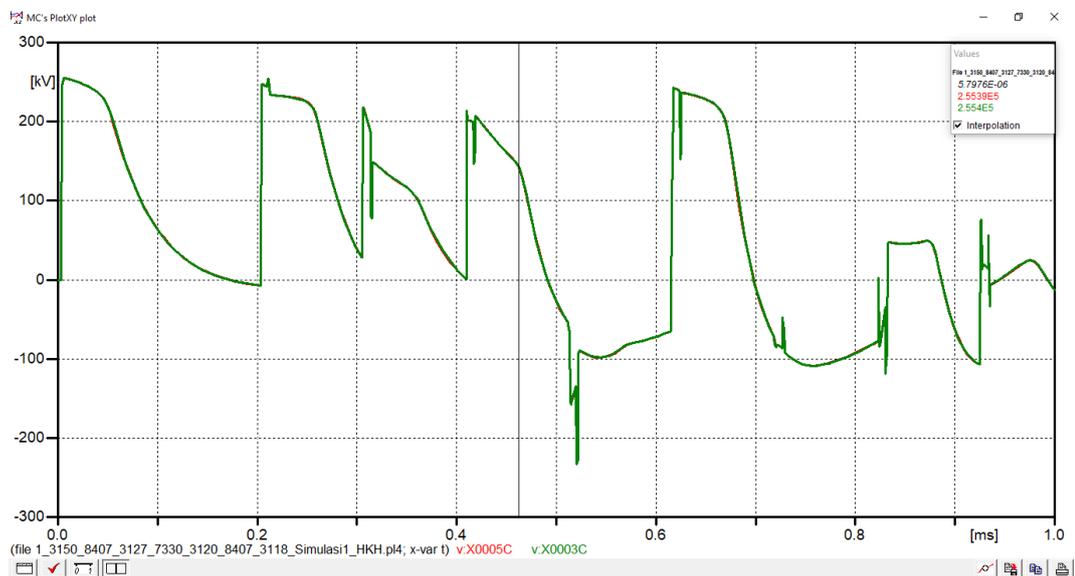
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar nilai arus di titik arrester dan jepitan transformator yang terjadi saat waktu muka petir 1.0129×10^{-3} s adalah 37.734 ampere. Hal ini membuktikan bahwa penempatan arrester dengan jarak 3.15 meter dari transformator mampu mengurangi arus akibat sambaran petir sampai 2268.6 ampere.

b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik tegangan terhadap waktu dititik arrester (X0005C) dan jepitan transformator (X0003C).



Gambar 4.23 Gelombang tegangan terhadap waktu dititik arrester dan jepitan primer transformator
(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.24 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu dititik arrester dan
jepitan primer transformator
(sumber: *Software ATP*)

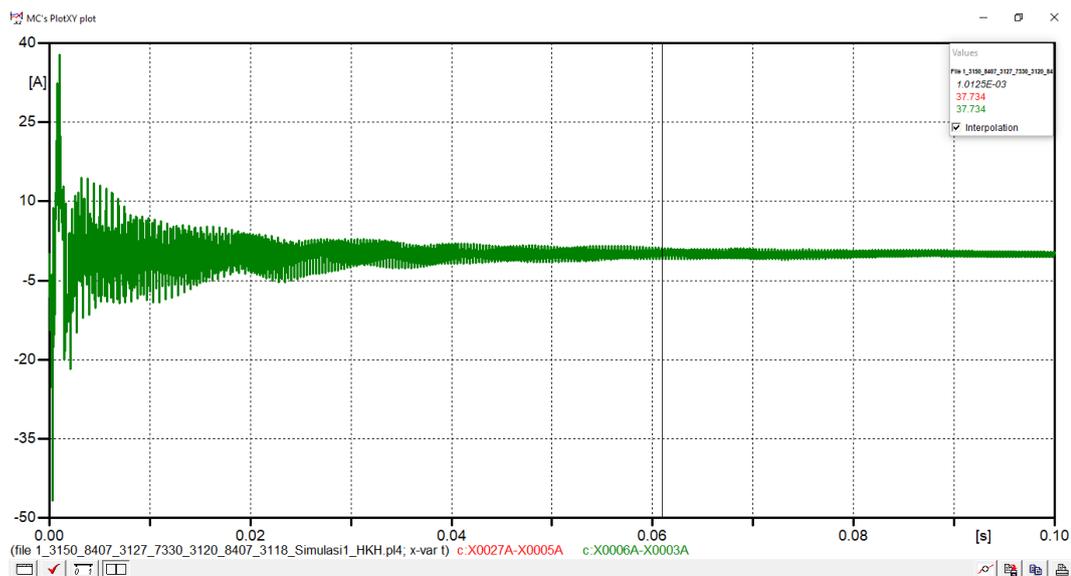
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar tegangan puncak impuls dan waktu muka petir pada arrester dan jepitan transformator primer adalah 255.43 kV 5.7976×10^{-6} ms. Hal ini membuktikan bahwa penempatan arrester dengan jarak 3.15 meter dari transformator mampu memotong nilai tegangan sambaran petir menjadi 605.66 kV.

2. Asumsi Jarak Ideal Arrester dan Transformator 15 Meter

Pada skenario ini jarak arrester terhadap transformator adalah 15 meter berdasarkan data asli yang ada dilapangan (Gardu Induk Bantul 150 kV)

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik arus terhadap waktu dititik arrester (c:X00027A-X0005A) dan jepitan transformator (c:X0006A-X0003A)

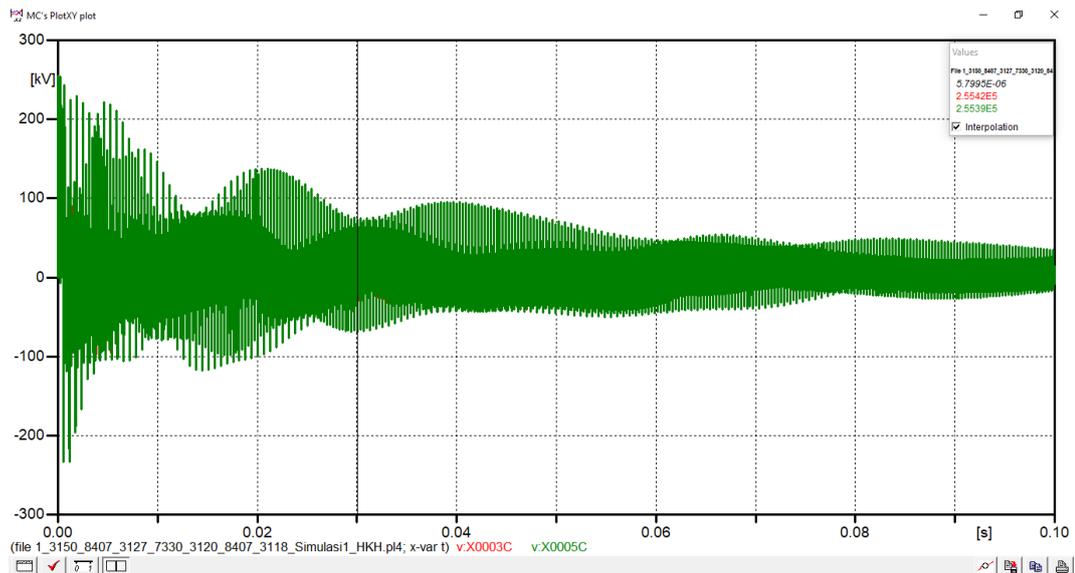


Gambar 4.25 Kondisi gelombang arus terhadap waktu dititik arrester dan jepitan primer transformator (sumber: *Software ATP*)

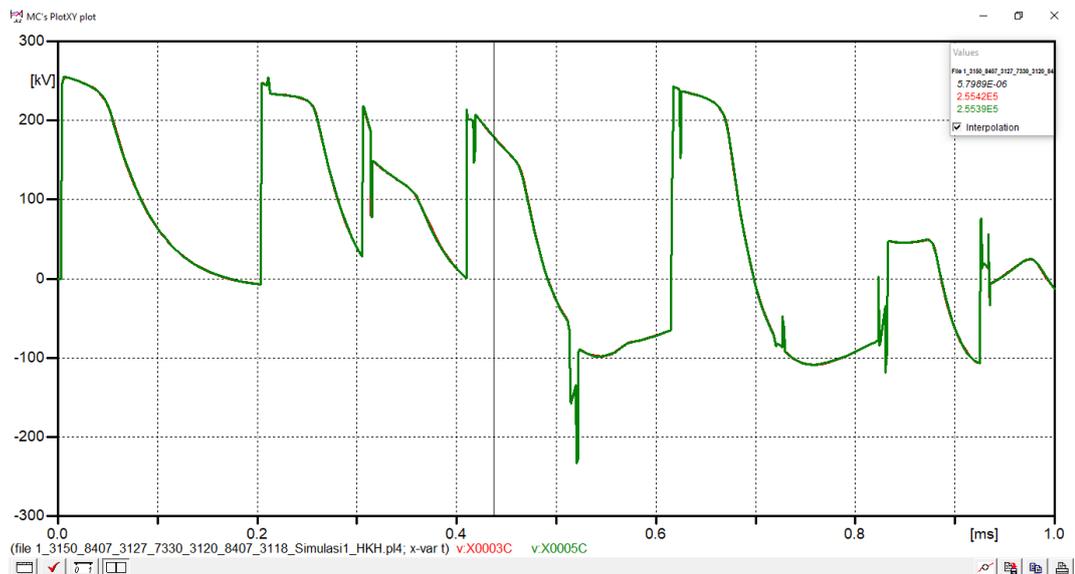
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar nilai arus di titik arrester dan jepitan transformator yang terjadi saat waktu muka petir 1.0125×10^{-3} s adalah 37.734 ampere. Hal ini membuktikan bahwa penempatan arrester dengan jarak 15 meter dari transformator mampu mengurangi arus akibat sambaran petir sampai 2268.66 ampere.

b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik tegangan terhadap waktu dititik arrester (v:X0005C) dan jepitan transformator (v:X0003C) saat pemasangan arrester dengan jarak 15 meter dari transformator.



Gambar 4.26 Gelombang tegangan terhadap waktu dititik arrester dan jepitan primer transformator
(sumber: *Software ATP*)



Gambar 4.27 *Detail* gelombang tegangan terhadap waktu dititik arrester dan jepitan primer transformator
(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar tegangan puncak impulse dan waktu muka petir pada arrester dan jepitan transformator primer adalah 255.49 kV 5.7989×10^{-6} ms. Hal ini membuktikan bahwa penempatan arrester dengan jarak 15 meter dari transformator mampu memotong nilai tegangan sambaran petir menjadi 605.66 kV.

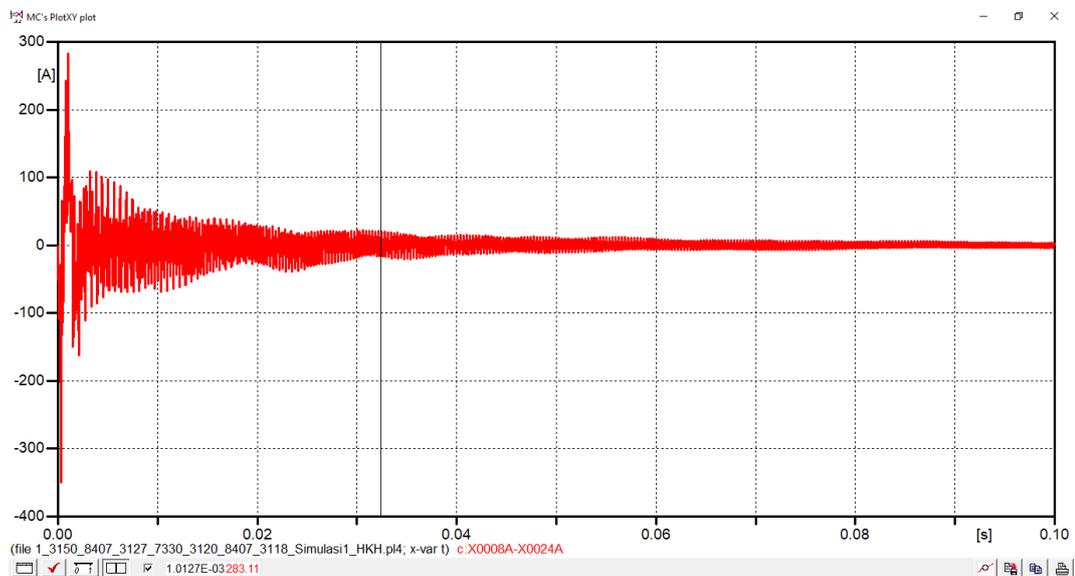
1.11.2.3 Kondisi Ketiga di Beban (*Load*)

1. Asumsi Jarak Ideal Arrester dan Transformator 3.15 Meter

Pada skenario ini jarak arrester terhadap transformator adalah 3.15 meter berdasarkan analisis perhitungan standar dari IEC (1958) dan SPLN (1978:4).

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik arus terhadap waktu dititik beban/*load* (c:X0008A-X0024A) saat terpasang arrester dengan jarak 3.15 meter dari transformator.



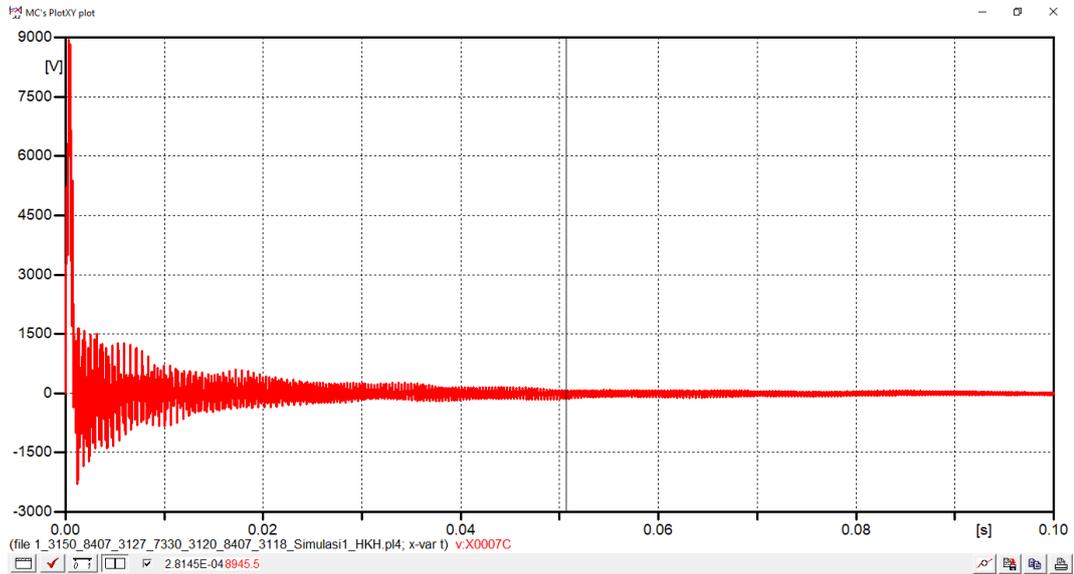
Gambar 4.28 Kondisi gelombang arus terhadap waktu dibeban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar nilai arus dititik beban (*load*) yang terjadi saat waktu muka petir 1.0127×10^{-3} s adalah 283.11 ampere

b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik tegangan terhadap waktu dititik beban (v:X0007C).



Gambar 4.29 Kondisi gelombang tegangan terhadap waktu dibeban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)

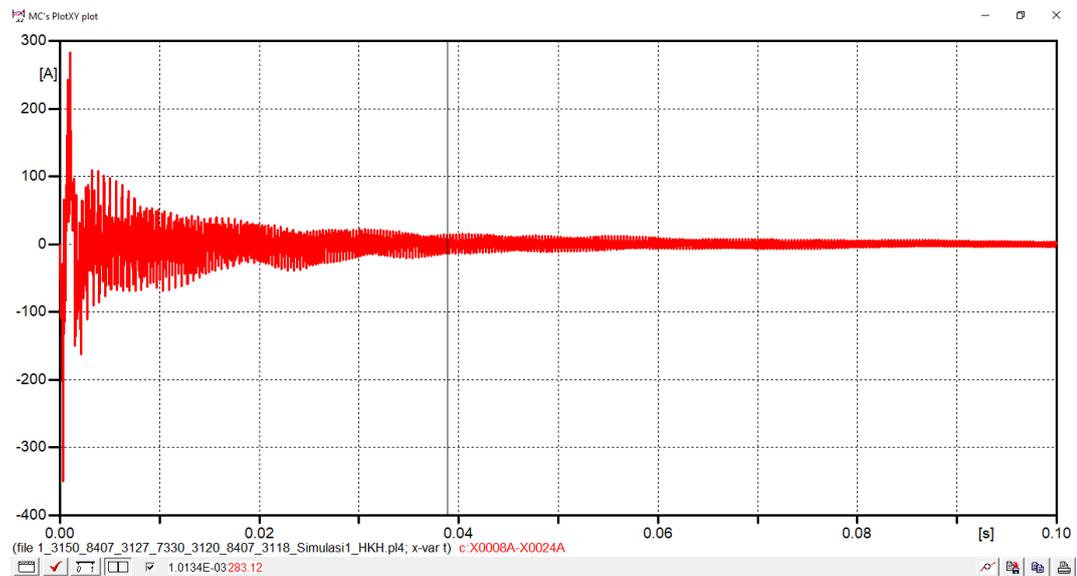
Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar impulse tegangan akibat sambaran petir dibeban adalah 8.9455 kV saat waktu muka petir 2.8145×10^{-4} s.

2. Asumsi Jarak Ideal Arrester dan Transformator 15 Meter

Pada skenario ini jarak arrester dan transformator adalah 15 meter berdasarkan data asli yang ada dilapangan Gardu Induk Bantul 150 kV.

a. Arus Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik arus terhadap waktu dititik beban (c:X0008A-X0024A)



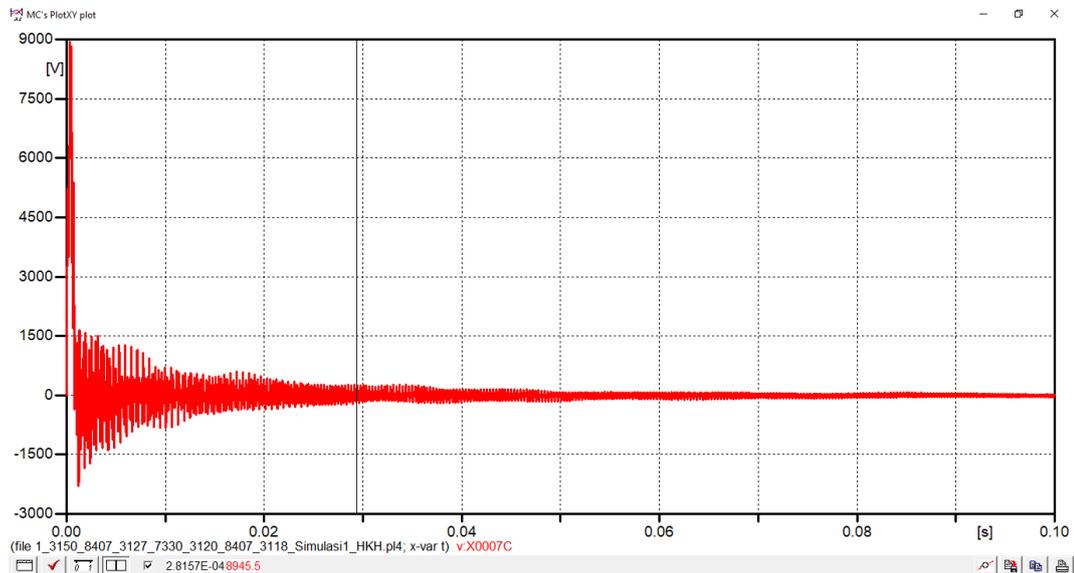
Gambar 4.30 Kondisi gelombang arus terhadap waktu dibeban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar nilai arus dititik beban (*load*) yang terjadi saat waktu muka petir 1.0134×10^{-3} s adalah 283.12 ampere.

b. Tegangan Terhadap Waktu

Berikut adalah gambar grafik tegangan terhadap waktu dititik beban (v:X0007C).



Gambar 4.31 Kondisi gelombang tegangan terhadap waktu dibeban (*load*)

(sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa besar *impulse* tegangan akibat sambaran petir dibeban (*load*) adalah 8.9455 kV saat waktu muka petir 2.8157×10^{-4} s.

1.11.2.4 Tabel Perbandingan Tegangan dan Arus Saat Sistem Terpasang Arrester

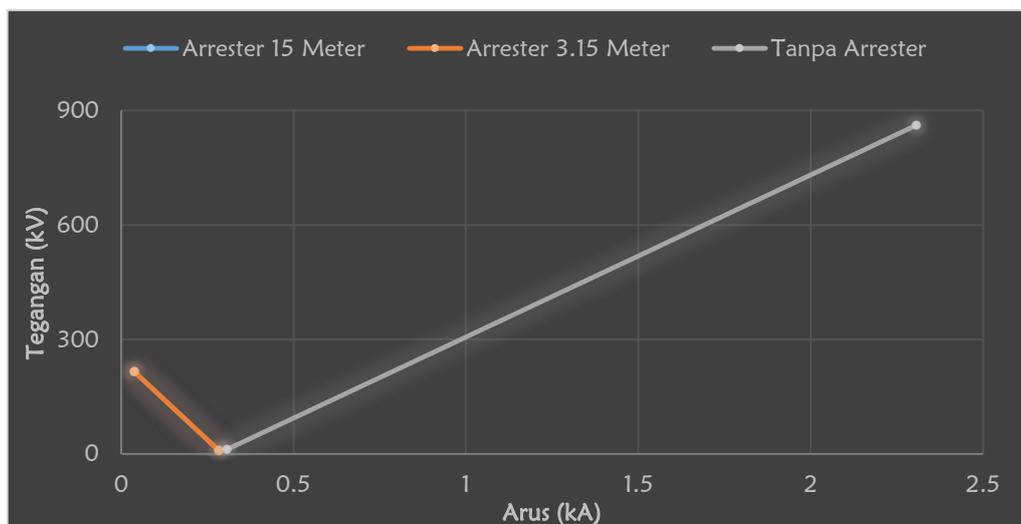
Berikut ini adalah tabel perbandingan besar arus dan tegangan terhadap waktu akibat sambaran petir (*lightning surge*) dari ketiga lokasi titik (*node*) saat sistem terpasang arrester.

Tabel 4.10 Perbandingan puncak tegangan dan arus saat sistem terpasang arrester

Nilai (Terhadap Waktu)	Tempat				
	Sambaran petir	Arrester - Trafo Primer		Beban (<i>load</i>)	
		3.15 meter	15 meter	3.15 meter	15 meter
Tegangan (kV)	779.27	255.43	255.48	8.9455	8.9455
Arus (A)	2729.8	37.734	37.734	283.11	283.12

1.11.3 Grafik Perbandingan Tegangan dan Arus

Berikut ini adalah grafik perbandingan tegangan dan arus terhadap waktu dititik beban (*load*) dan jepitan (*bushing*) transformator primer akibat sambaran petir dengan impuls tegangan 861.06 kV dan waktu muka petir 1.2454×10^{-3} ms pada Gardu Induk Bantul 150 kV dari skenario saat sistem tidak terpasang arrester, sistem terpasang arrester dengan jarak 3.15 meter dan 15 meter dari transformator.



Gambar 4.32 Grafik perbandingan tegangan dan arus terhadap waktu muka petir 1.2454×10^{-3} ms pada Gardu Induk Bantul saat jarak arrester 3.15 meter, 15 meter dan tanpa arrester (sumber: *Software ATP*)

Berdasarkan grafik diatas nilai tegangan dan arus saat sistem tanpa pemasangan arrester dititik beban (*load*) adalah 11.573 kV; 0.30752 kA dan dititik jepitan (*bushing*) transformator primer adalah 861.06 kV; 2.3006 kA. Kemudian, nilai tegangan dan arus setelah sistem dipasang arrester dengan jarak 3.15 meter dititik beban dan jepitan transformator berturut-turut adalah (8.945 kV 0.283 kA) dan (215.43 kV 0.037 kA). Setelah jarak diubah menjadi 15 meter besar nilai tegangan dan arus dititik beban dan jepitan transformator berturut-turut adalah (8.945 kV 0.283 kA) dan (215.49 kV 0.037 kA). Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa jarak ideal minimal dan maksimal antara arrester dan transformator tenaga di Gardu Induk Bantul 150 kV adalah 3.15 meter dan 15 meter.