

Penentuan Konstante Pembentuk Muka Dan Ekor Gelombang Impuls Arus Petir

Soetjipto Soewono dan Rudy Setiabudy

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

e-mail: stsoewono@yahoo.com, rudy@eng.ui.ac.id

Abstrak

Gelombang arus petir merupakan hasil pelepasan muatan listrik awan ke tanah. Gelombang tersebut dinyatakan dalam bentuk waktu muka gelombang dan waktu ekor gelombang. Konstanta "k" merupakan perbandingan antara waktu ekor gelombang dengan waktu muka gelombang. Pendekatan matematis untuk menentukan bentuk gelombang impuls yang berdasarkan konstanta "k" telah banyak dipublikasikan, tetapi terbatas pada harga konstanta "k" yang besar yaitu untuk gelombang impuls yang mempunyai ekor panjang. Pada makalah ini akan diuraikan tentang penentuan konstanta "k" pada gelombang impuls yang mempunyai ekor pendek dan panjang. Konstanta "k" hasil eksperimen digunakan untuk menentukan bentuk gelombang impuls. Perbandingan hasil pendekatan matematis dan eksperimen menunjukkan hasil yang sangat memuaskan.

Kata kunci: Petir, gelombang impuls, waktu muka gelombang dan waktu ekor gelombang

Abstract

Lightning current waves are resulted by electric discharge from the clouds to the ground. These waves are stated as a wave-front time and wave-tail time. The comparison between the wave-tail time and the wave front time defined as a constant "k". A mathematical approach to determine the impulse wave which base on the constant "k" has been published, however these were limited by the big constant "k" or the wave which has a long tail. This paper will explain how to determine the constant "k" of impulse wave which has a short and long tail. The constant "k" resulted from the experiment will be applied to determine the impulse wave. The comparison from the experiment and mathematical approach resulting very satisfactory outcome.

Keywords: Lightning, impulse wave, wave-front time and wave-tail time

1. Pendahuluan

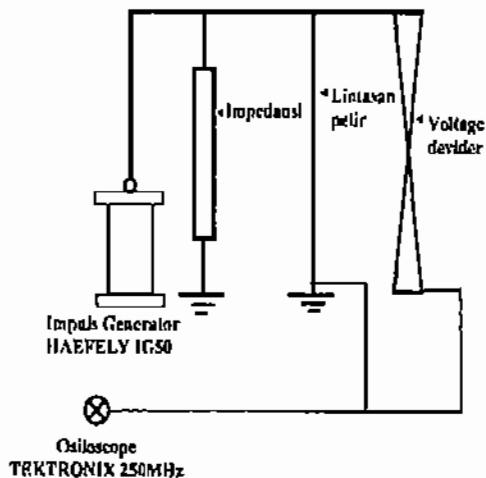
Pendekatan matematis persamaan gelombang impuls arus petir diperlukan untuk perencanaan keandalan sistem terhadap gangguan tegangan lebih. Bentuk gelombang arus petir sangat bervariasi. Hasil pencatatan arus petir dengan menggunakan roket pemancing petir, terukur 13,5 kA, waktu muka gelombang T_f 15,56 μ det dan waktu ekor gelombang T_r 40 μ det [4], sedangkan pengukuran lainnya Kennedy Space Center, Florida minimum 2,5 ka dan maksimum 60 kA, Saint-Privat d'Allier, France minimum 4,5 kA dan maksimum 49,9 kA, T_f 250 ns sampai dengan 4900 ns, T_r 14,7 μ det sampai dengan 103,2 μ det, Camp Blanding, Florida

minimum 5 ka dan maksimum 44,4 ka, T_f 54 ns sampai dengan 4000 ns dan T_r 2,4 μ det sampai dengan 100 μ det [3]. Bentuk gelombang petir yang distandarisir 1,2/50 μ s untuk tegangan dan 8/20 μ s untuk arus [5,6]. Dengan demikian untuk menentukan konstanta gelombang tegangan dan arus mempunyai cara yang berbeda, karena konstanta "k" yang merupakan perbandingan antara waktu ekor gelombang dan muka gelombang pada impuls tegangan jauh lebih besar dari impuls arus. Apabila perbandingan waktu ekor dan waktu muka $\approx e$ (2,718281828), maka ekor gelombang impuls dapat dikategorikan pendek, Sehingga penentuan konstanta "k" gelombang impuls yang mempunyai ekor pendek berbeda dengan yang mempunyai

ekor panjang seperti impuls arus dan impuls tegangan.

2. Tahapan Penelitian

1. Mencari konstanta pembentuk ekor gelombang dan muka gelombang, berdasarkan waktu muka dan waktu ekor gelombang impuls yang ditentukan.
2. Mendapatkan bentuk gelombang impuls dari persamaan umum gelombang impuls.
3. Merubah bentuk gelombang tegangan impuls petir 1,2 x 50 μ s keluaran generator impuls dengan memasang impedansi sehingga muka gelombang impuls menjadi lebih panjang. Bentuk gelombang tegangan impuls dicatat osciloscope melalui voltage divider (Gbr.1).
4. Merubah gelombang tegangan impuls petir menjadi gelombang arus impuls petir dengan cara memasang simulasi lintasan petir (Gbr. 1).
5. Arus impuls petir yang melalui lintasan petir dicatat dengan osciloscope dan merupakan bentuk gelombang impuls yang mempunyai ekor yang pendek (Gbr. 1).
6. Melakukan validasi hasil perhitungan dengan cara membandingkan bentuk gelombang impuls hasil perhitungan dengan hasil pengukuran.



Gambar 1.
Rangkaian Percobaan Simulasi Arus Sambaran Petir

3. Gelombang Arus Petir

Arus petir merupakan pelepasan muatan awan yang dialirkan ke bumi dan mempunyai bentuk umum :

$$I = A \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \right) \quad 1$$

dengan:

A = harga puncak

α = konstanta pembentuk muka gelombang

β = konstanta pembentuk ekor gelombang

Arus petir pada persamaan 1 akan mempunyai nilai maksimum apabila $\frac{dI}{dt} = 0$.

Harga arus petir maksimum dicapai pada saat waktu t mencapai waktu puncak T_f , sehingga harga A dan T_f dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\frac{dI}{dt} = A \left(-\alpha e^{-\alpha T_f} + \beta e^{-\beta T_f} \right) = 0 \quad 2$$

$$T_f = \frac{1}{\beta - \alpha} \ln(b) \quad 3$$

$$A = \frac{I_{maks}}{e^{-\alpha T_f} - e^{-\beta T_f}} \quad 4$$

Dengan demikian persamaan gelombang impuls pada persamaan 1 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I = \frac{I_{maks}}{\left(e^{-\alpha T_f} - e^{-\beta T_f} \right)} \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \right) \quad 5$$

Untuk mencari harga α dan β , harus dibedakan caranya untuk gelombang impuls yang mempunyai waktu ekor gelombang pendek ($T_t \approx T_f$) dan waktu ekor gelombang panjang ($T_t \gg T_f$).

Harga setengah harga puncak dicapai pada saat waktu mencapai t_s , atau setengah harga puncak sehingga didapat kondisi sebagai berikut :

$$\left(e^{-\alpha t_s} - e^{-\beta t_s} \right) = \frac{1}{2} \left(e^{-\alpha T_f} - e^{-\beta T_f} \right) \quad 6$$

apabila :

$$k = \frac{T_t}{T_f} \quad \text{dan} \quad b = \frac{\beta}{\alpha} \quad \text{maka} \quad 7$$

$$\frac{\alpha}{\beta - \alpha} = \frac{1}{b - 1} \quad 8$$

$$\frac{\beta}{\beta - \alpha} = \frac{b}{b - 1} \quad 9$$

Dengan demikian persamaan 6 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\left(\frac{k \frac{1}{1-b} \ln(b)}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{k \frac{b}{1-b} \ln(b)}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{b}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right) \quad 10$$

3.1. Untuk Gelombang Impuls Dengan Ekor Gelombang Pendek

Pada waktu gelombang impuls mencapai waktu T_b , penulis mendeteksi bahwa titik tersebut terdapat pada ekor gelombang, sehingga suku pertama pada ruas kiri persamaan 10 diabaikan. dengan demikian persamaan 10 dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut :

$$-e^{-k \frac{b}{1-b} \ln(b)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{b}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right)$$

$$k = \frac{1-b}{b \ln(b)} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{b}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right) \right] \quad 11$$

Gelombang impuls dengan ekor gelombang pendek dalam percobaan merupakan bentuk gelombang arus, sehingga hasil perhitungan harga k sebagai fungsi ln (b) dari persamaan 11 pada gelombang arus dapat dilihat pada tabel 1 dan digambarkan pada gambar 2a

3.2. Untuk Gelombang Impuls Dengan Ekor Gelombang Panjang

Suku kedua dalam persamaan 10 jauh lebih kecil dari suku pertama, maka suku kedua pada ruas kiri persamaan 10 diabaikan dengan demikian persamaan 10 dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut :

$$e^{-k \frac{1}{1-b} \ln(b)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{b}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right)$$

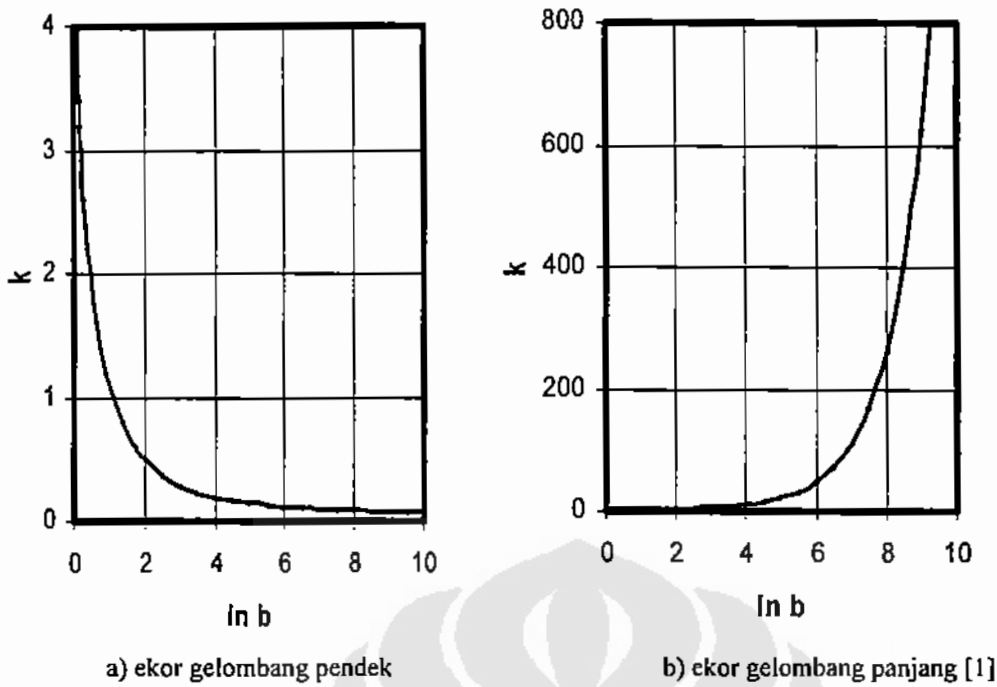
$$k = \frac{1-b}{\ln(b)} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{e^{\frac{1}{1-b} \ln(b)}} - \frac{b}{e^{\frac{b}{1-b} \ln(b)}} \right) \right] \quad 12$$

Gelombang impuls dengan ekor gelombang panjang dalam percobaan merupakan bentuk gelombang tegangan, sehingga hasil perhitungan harga k sebagai fungsi ln (b) dari persamaan 12 pada gelombang arus dapat dilihat pada tabel 1 dan digambarkan pada gambar 2b [1].

Tabel 1.

Perbandingan Waktu Ekor dan Waktu Muka Gelombang "k" Sebagai Fungsi Perbandingan Konstanta Pembentuk Ekor dan Muka Gelombang "ln b"

ln b	k	
	Arus Amper	Tegangan Volt
0,05	4,574	-
0,24	2,786	-
0,25	2,727	-
0,50	1,886	-
0,75	1,410	-
1,00	1,096	2,979
2,00	0,498	3,678
3,00	0,286	5,734
4,00	0,193	10,533
5,00	0,146	21,634
6,00	0,118	47,656
7,00	0,100	109,620
8,00	0,087	259,317
9,00	0,077	625,096
10,00	0,069	-



Gambar 2.

Grafik Perbandingan Waktu Ekor Gelombang dan Waktu Muka Gelombang K Terhadap Logaritma Perbandingan Konstante Muka Gelombang dan Ekor Gelombang ln (b)

4. Eksperimen

4.1. Perolehan data

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan rangkaian seperti ditunjukkan pada gambar 1. Untuk mendapatkan bentuk gelombang tegangan impuls yang dapat dirubah menjadi bentuk gelombang arus dengan bentuk gelombang yang mempunyai ekor gelombang pendek mengalir melalui lintasan petir yang mempunyai induktansi L 11.86 mH, maka setelah generator impuls perlu dipasang suatu impedansi yang terdiri dari dua buah

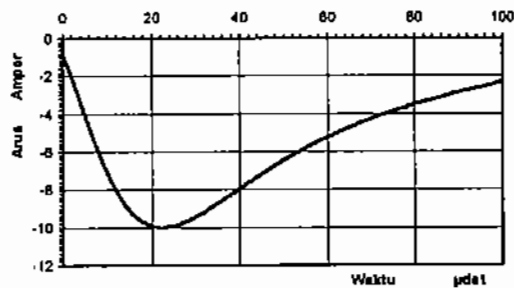
tahanan R 1.67 kΩ paralel dengan kapasitor 4122 pF, 125 kV.

Pencatatan arus petir pada ujung lintasan petir dengan oscilloscope digital 250 MHz melalui tahanan shunt dan serat optik yang bertujuan untuk menghindari pengaruh gelombang elektromagnetik parasit, dan hasil pencatatannya didapat gelombang impuls 22,35/62,25 µdet, 10 Amper.

Hasil pencatatan waktu t dan arus I dari oscilloscope digital dapat dilihat pada tabel 2, sedangkan bentuk arus hasil pencatatan dapat dilihat pada gambar 3.

Tabel 2. Data Arus Petir I Terhadap Waktu t yang Dibangkitkan Generator Impuls

t µdet	I Amp	t µdet	I Amp	t µdet	I Amp	t µdet	I Amp	t µdet	I Amp
0	-0,857	20	-9,924	40	-7,924	60	-5,245	80	-3,488
2	-2,050	22	-9,999	42	-7,618	62	-5,028	82	-3,363
4	-3,419	24	-9,973	44	-7,314	64	-4,837	84	-3,256
6	-4,780	26	-9,866	46	-7,021	66	-4,637	86	-3,132
8	-6,021	28	-9,667	48	-6,728	68	-4,438	88	-2,997
10	-7,155	30	-9,428	50	-6,438	70	-4,271	90	-2,866
12	-8,051	32	-9,165	52	-6,172	72	-4,098	92	-2,755
14	-8,789	34	-8,851	54	-5,925	74	-3,955	94	-2,656
16	-9,343	36	-8,546	56	-5,682	76	-3,653	96	-2,571
18	-9,710	38	-8,248	58	-5,342	78	-3,653	98	-2,447



Gambar 3.
Gelombang Arus Petir Dengan Ekor Gelombang Pendek.

4.2. Aplikasi penentuan konstanta

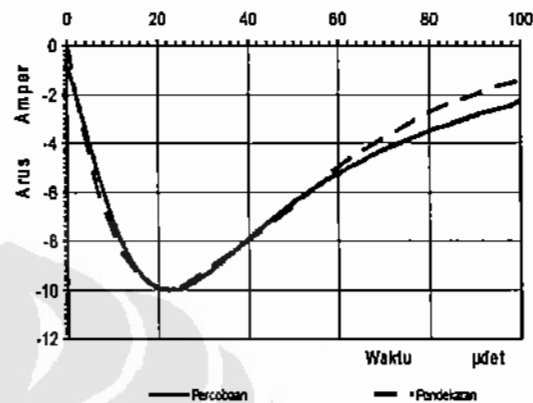
Persamaan gelombang arus petir merupakan persamaan dengan bentuk *double exponential*, yang terdiri dari eksponensial pembentuk muka gelombang dan pembentuk ekor gelombang. Dengan menggunakan hasil pencatatan bentuk gelombang impuls arus, gambar 1a dan persamaan 7, akan didapat konstanta pembentuk muka gelombang (α) dan konstanta pembentuk ekor gelombang (β). sehingga gelombang impuls persamaan 1 tersebut dapat didekati dalam bentuk *double exponentialle* sebagai berikut :

$$I = -115 \left(e^{-0,0406t} - e^{-0,0516t} \right) \quad 13$$

5. Analisis

Pada persamaan gelombang arus petir yang umumnya mempunyai waktu ekor gelombang pendek atau perbandingan waktu ekor dan waktu muka gelombang $\approx e$, dilakukan pendekatan bahwa harga suatu titik dari variabel waktu terletak pada ekor gelombang, sehingga *exponential* pembentuk muka gelombang diabaikan pada persamaan gelombang impuls arus. Sebaliknya untuk gelombang impuls tegangan yang umumnya mempunyai waktu ekor gelombang panjang atau perbandingan waktu ekor dan waktu muka gelombang $\gg 1$. Dengan demikian bentuk grafik perbandingan waktu ekor gelombang dan waktu muka gelombang k terhadap logaritma perbandingan konstanta muka gelombang dan ekor gelombang $\ln(b)$ mempunyai arah yang berlawanan, seperti

yang ditunjukkan pada gambar 2. Untuk melakukan validasi hasil pendekatan perhitungan secara matematis bentuk persamaan gelombang arus petir dengan ekor gelombang pendek pada makalah ini dilakukan dengan cara membandingkan gambar impuls hasil pendekatan perhitungan dengan eksperimen seperti ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4.
Gelombang Arus Petir Hasil Eksperimen dan Pendekatan Perhitungan

Perbedaan hasil pendekatan perhitungan dengan eksperimen terletak pada waktu awal dan waktu mencapai harga setengah puncak gelombang impuls. Pada eksperimen, pencatatan oscilloscope tidak diawali pada titik nol, dimana pada titik nol harga impuls arus tidak nol dan sudah mempunyai harga $-0,857$ Amper dan pada waktu setengah harga puncak gelombang mempunyai harga $-4,999$ Amper, sedangkan pada waktu mencapai harga puncak, tidak ada perbedaan antara harga puncak hasil pendekatan perhitungan dengan hasil eksperimen. Dengan demikian hasil pendekatan perhitungan dengan hasil eksperimen tidak mempunyai perbedaan yang signifikan.

6. Kesimpulan.

Perbandingan hasil pendekatan perhitungan matematis dan eksperimen untuk gelombang impuls arus petir dengan ekor pendek mempunyai perbedaan yang tidak signifikan sehingga pendekatan perhitungan gelombang impuls ekor pendek

yang disajikan dalam makalah ini dapat dipergunakan untuk menyelesaikan persamaan bentuk gelombang impuls ekor pendek.

Daftar Acuan

- [1]. Jha, R.S. (1981), "*High Voltage Engineering*", Nai Sarak, Dehli, Dhampat Rai & Sons, 1981.
- [2]. Kuffel, E. and W.S. Zaengl (1984), "*High Voltage Engineering Fundamentals*", Oxford, Pergamon Press, 1984
- [3]. Schoene, J., M. A. Uman, V. A. Rakov, V. Kodali, K. J. Rambo, and G. H. Schnetzer (2003), "*Statistical characteristics of the electric and magnetic fields and their time derivatives 15 m and 30 m from triggered lightning*," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. D6, 4192, 2003, pp. ACL 6-1 – ACL6-18.
- [4]. PT. PLN (Persero)-Pusat Penyelidikan Masalah Kelistrikan (1995), "*Penelitian Petir Menggunakan Roket Berkawat di PTP XII Gunung Mas Puncak*," *Laporan Penelitian dan Pengembangan*, RDLMK 95-04, 13 Januari 1995.
- [5]. IEC Publ. 60
- [6]. IEEE Std 4-1995, "*IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing*".