

Perancangan Perangkat Lunak Untuk Mendeteksi Tingkat Keandalan SUTET Terhadap Sambaran Petir Dengan Metode 2 Titik

Aeri Rachmad, Teknik Multimedia & Jaringan, Universitas Trunojoyo Madura, Bangkalan

Riza Alfita, Teknik Elektro, Universitas Trunojoyo Madura, Bangkalan

M. Yusuf Idris, Geografi, Universitas Negeri Malang

ABSTRAK

Gangguan petir pada saluran transmisi adalah gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir pada saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), baik secara langsung maupun tidak langsung (sambaran Induksi) sehingga menyebabkan terganggunya keberlangsungan penyaluran daya listrik dari pusat layanan ke pusat beban. Pada saluran transmisi, petir merupakan penyebab utama pemutusan yang tidak direncanakan karena tinggi dan panjangnya saluran akan berbanding lurus dengan jumlah gangguan yang diakibatkan oleh sambaran petir, untuk mendapatkan kontinuitas penyaluran daya listrik yang baik tentunya diperlukan saluran transmisi dengan tingkat kehandalan yang cukup tinggi. Mengingat pentingnya kontinuitas pelayanan saluran transmisi tersebut maka diperlukan suatu software yang dapat memprediksi jumlah sambaran yang mengenai Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi maupun jumlah gangguan yang diakibatkan oleh sambaran langsung maupun sambaran induksi, berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa prosentase terjadinya lompatan api di fasa R sebesar 74,89% diikuti oleh fasa S sebesar 25,11%, dengan angka keluar sebesar 0,34123/23,093 km, hasil yang didapatkan dari uji coba software tidak terlalu jauh dengan kenyataan gangguan yang ada di lapangan yaitu sebesar 0,34123/23,093 km, dengan waktu gangguan 7ms.

Kata kunci: SUTET, Petir

1. Pendahuluan

Peran utama dari suatu sistem tenaga listrik adalah menyediakan dan menyalurkan energi listrik secara handal dan *continue* kepada beban. Secara umum kehandalan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai suatu kemampuan sistem untuk memberikan suatu pasokan tenaga listrik yang cukup dengan kualitas yang memuaskan. Kehandalan sistem tenaga listrik ditentukan oleh penilaian kecukupan (*adequacy assesment*) dan penilaian keamanan (*security assesment*). Hal itu berarti keandalan suatu sistem tenaga listrik ditentukan oleh kemampuan sistem untuk memasok energi listrik yang cukup ke pelanggan yang memenuhi persyaratan dengan cara yang memuaskan dan kemampuan sistem untuk tetap mampu bertahan akibat adanya gangguan yang mendadak seperti hubung singkat atau hilangnya elemen sistem yang tak dapat diantisipasi (Kim, 2010; Pottonen, 2011 dan yeu 2008)

Pada saat ini, kebanyakan sistem tenaga listrik sudah merupakan sistem interkoneksi antara satu pusat pembangkit dengan pembangkit lainnya dengan harapan

apabila salah satu dari pusat pembangkit atau saluran transmisi mengalami gangguan maka pasokan tenaga listrik tetap dapat berjalan. Di sisi lain, interkoneksi sistem tenaga listrik juga mempunyai beberapa kelemahan. Salah satu kelemahannya adalah apabila terjadi gangguan pada salah satu sistem, karena adanya beban lebih dan ketidakstabilan tegangan, akan berpengaruh ke sistem yang lain. Gangguan yang pada awalnya bersifat sementara dan terjadi pada bagian sistem yang mengalami gangguan saja, jika tidak ada tindakan perbaikan untuk mengatasi gangguan tersebut, maka gangguan akan tetap berlangsung dan terjadi pelepasan bertingkat yang pada akhirnya akan mengakibatkan pemadaman total (Brown, 2012)

Pada kenyataannya, gangguan yang berupa lepasnya elemen sistem (*outage*) dalam sistem tenaga listrik adalah sesuatu yang tidak dapat sepenuhnya dihindarkan. Lepasnya elemen sistem dapat terjadi karena gangguan (*force outage*) atau karena pemeliharaan (*planned outage*). *Forced outage* adalah lepasnya elemen sistem yang disebabkan oleh adanya gangguan (*fault*) misalnya saluran transmisi yang terkena sambaran petir, terkena badai, kerusakan pada transformator atau generator, sedangkan

planned outage adalah lepasnya elemen sistem karena adanya pemeliharaan peralatan pada sistem tersebut. Pemeliharaan peralatan dari sistem tenaga listrik sebagian besar memerlukan pembebasan tegangan yang berarti bahwa peralatan yang dipelihara harus dikeluarkan dari operasi (Marsudi, 2005)

Gangguan petir pada saluran transmisi adalah gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir pada saluran transmisi. Baik secara langsung maupun tidak langsung (sambaran induksi) sehingga menyebabkan terganggunya kontinuitas penyaluran daya listrik dari suatu saluran transmisi. Pada saluran transmisi petir merupakan penyebab utama pemutusan yang tidak direncanakan, sehingga harus diketahui betul tingkat bahayanya. Suatu sistem tenaga listrik dikatakan handal apabila dapat mensuplai beban secara *continue*. Panjangnya saluran dan keadaan alam seperti bahaya sambaran petir di sepanjang saluran mempengaruhi keandalan saluran. Keandalan pada sistem erat kaitannya dengan masalah pemutusan akibat gangguan. Dari sudut pandang keteknikan keandalan adalah kemungkinan bekerjanya suatu sistem (saluran) sesuai fungsinya pada periode waktu tertentu dibawah kondisi tertentu.

Untuk mendapatkan kontinuitas penyaluran daya listrik yang baik tentunya diperlukan saluran transmisi dengan tingkat keandalan yang cukup tinggi. Keandalan dari saluran transmisi ditentukan oleh jumlah angka keluar selama operasi berlangsung. Yang dimaksud angka keluar disini adalah jumlah gangguan tidak berfungsinya saluran transmisi per 100 km/tahun yang disebabkan oleh sambaran petir.

Mengingat pentingnya kontinuitas penyaluran saluran transmisi maka diperlukan suatu perangkat lunak perhitungan tingkat keandalan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi yang hasilnya akurat dan sesuai dengan keadaan yang ada dilapangan.

1.1. Lightning Outage

Lightning outage adalah gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir pada saluran transmisi, baik secara langsung maupun tidak langsung (sambaran induksi) sehingga menyebabkan terganggunya kontinuitas penyaluran daya listrik dari saluran transmisi tersebut. Pada saluran transmisi, petir merupakan pemutusan yang tidak direncanakan dalam penyaluran daya listrik. Satuan gangguan atau biasa disebut angka keluar akibat sambaran petir dinyatakan dalam satuan gangguan per 100 km/tahun

Petir terjadi berawal dari proses fisika dimana terjadi pengumpulan muatan listrik di awan. Dalam keadaan normal, di atmosfer bumi terdapat ion positif dan ion negatif yang tersebar acak. Ion-ion ini terjadi karena tumbukan atom, pancaran sinar kosmis dan energi termis. Pada keadaan cuaca cerah terdapat medan listrik yang berarah kebawah menuju bumi. Dengan adanya medan listrik tersebut maka butiran-butiran yang ada di udara akan terpolarisasi karena induksi. Bagian atas bermuatan negatif dan bagian bawah bermuatan positif. Di awan ada kalanya terjadi pergerakan arus udara keatas membawa butir-butir

air yang berat jenisnya lebih tinggi. Karena mengalami pendinginan, butiran air ini membeku sehingga berat jenisnya membesar mengakibatkan gerakan kebawah dengan kecepatan sangat tinggi

Dalam pergerakannya, timbul gaya tarik terhadap ion-ion negatif dan ion positif ditolak. Akibat butiran air besar yang mengandung ion negatif dan berkumpul bagian bawah awan, sementara pada bagian atas awan akan berkumpul ion bermuatan positif. Bersamaan terjadinya pengumpulan muatan, pada awan akan timbul medan listrik yang intensitasnya semakin besar akibatnya gerakan kebawah butir-butir air menjadi terhambat atau terhenti. Akibat terbentuknya medan listrik antara awan dan permukaan bumi. Apabila medan listrik ini melebihi kekuatan tembus udara terjadilah pelepasan muatan. Distribusi muatan di awan, pada umumnya dibagian atas dimuatai muatan positif, sementara itu pada bagian bawah awan ditempati oleh muatan negatif

Sambaran akan diawali oleh kanal bermuatan negatif dari tanah. Polaritas awan tidak hanya berpengaruh terhadap arah sambaran, tetapi juga berpengaruh pada besar arus sambaran. Aliran muatan listrik yang terjadi antara awan dengan tanah disebabkan adanya kuat medan listrik, antara muatan awan dengan muatan induksi di permukaan tanah yang polaritasnya berlawanan. Semakin besar muatan yang terdapat diawan, semakin besar pula medan listrik yang terjadi. Apabila kuat medan ini melebihi kuat medan tembus udara, maka terjadilah aliran muatan dari awan ke tanah

Gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir dibagi dalam dua kelompok yaitu:

- a. Gangguan akibat sambaran langsung, yang terdiri dari:
 - Gangguan petir pada kawat tanah
 - Gangguan petir pada kawat fasa
- b. Gangguan akibat sambaran tidak langsung (sambaran induksi)

Pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi, gangguan akibat sambaran tidak langsung (sambaran induksi) ini kemungkinan sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Untuk keperluan perhitungan, gangguan petir pada kawat tanah dibagi lagi dalam tiga macam gangguan tergantung pada tempat dimana petir menyambar, yaitu :

- a. Gangguan petir pada menara transmisi, yaitu gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir pada kawat tanah yang cukup dekat dengan menara
- b. Gangguan petir pada seperempat jarak menara
- c. Gangguan petir pada pertengahan jarak menara

Para peneliti sepakat bahwa jumlah sambaran menara diambil 60% dari seluruh sambaran yang mengenai saluran transmisi, sedang yang 40% dianggap menyambar kawat tanah jauh dari menara dengan perbandingan 30% pada seperempat menara dan 10% pada pertengahan jarak antar menara.

Untuk saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET), sambaran pada kawat tanah di seperempat dan pertengahan jarak antar menara dapat dianggap tidak menimbulkan gangguan. Hal ini disebabkan jarak antar kawat tanah dan

kawat fasa cukup jauh sehingga tidak mungkin lagi terjadi lompatan api.

Sambaran Ulang

Sesudah penyempurnaan terkaman balasan, arus kilat yang besarnya dapat mencapai 100 amper akan tetap mengalir, arus ini bertahan sampai 20.000 mikrodetik, akibatnya potensial pada bagian awan berkurang. Hal ini mengundang pelepasan muatan dari bagian awan yang berdekatan dengan daerah tersebut. Sehingga akan terjadi suatu penambahan muatan melalui penetrasi massa awan. Kecepatan jalur kilat dari sambaran ulang selanjutnya, kira-kira 3% dari



Gambar 1. Sambaran Balik (Return Stroke)

kecepatan cahaya, dan tidak mempunyai cabang. Setelah jalur kilat ini menyentuh tanah, maka diikuti dengan terkaman balasan tetapi dengan arus yang lebih kecil dari sambaran balasan pertama, terkaman selanjutnya mungkin terjadi sampai energi di awan didisipasi (Alvarado, 2008)

1.2. Sambaran Petir yang Mengenai Saluran Transmisi.

Saluran transmisi dapat membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada dibawahnya. Petir biasanya menyambar tanah yang berada dalam bayang-bayang dan akan menyambar saluran transmisi sebagai gantinya. Sedangkan petir diluar bayang-bayang itu sama sekali tidak menyambar saluran. Gambar 1. memperlihatkan pendekatan dari lebar bayang-bayang saluran transmisi dengan menggunakan 2 kawat tanah.

Sehingga luas bayang-bayang untuk 100 km panjang saluran transmisi adalah :

$$A = 100 \cdot (b + 4 \cdot h_g^{1,09}) \cdot 10^{-3} \text{ km} \quad (1)$$

Atau

$$A = 0,1 \cdot (b + 4 \cdot h_g^{1,09}) \text{ km}^2 / 100 \text{ km} \quad (2)$$

Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2, dapat dihitung jumlah sambaran ke saluran transmisi menggunakan persamaan :

$$N_L = 0,012 \cdot \text{IKL} \cdot (b + 4 \cdot h_g^{1,09}) \quad (3)$$

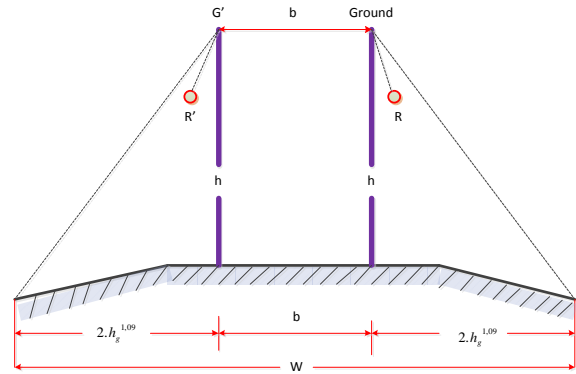
dimana :

N_L = jumlah sambaran ke saluran per 100 km per tahun

IKL = jumlah hari guruh per tahun

h_g = tinggi rata-rata kawat tanah (m)

b = jarak antar kawat tanah (m)



Gambar 2. Lebar Jalur Perisaian Terhadap Sambaran Petir

1.3. Perhitungan Impedansi Surja

Impedansi surja sendiri kawat tunggal dengan memperhitungkan korona adalah :

$$Z_{nn} = 60 \sqrt{\ln \frac{2 \cdot h}{R_{ek}} \ln \frac{2 \cdot h}{R_c}} \quad (4)$$

dimana :

Z_{nn} = impedansi surja sendiri kawat tunggal n (ohm)

H = tinggi rata-rata kawat diatas tanah (m)

R_{ek} = radius kawat tunggal (m)

R_c = radius sampul korona kawat berkas (m)

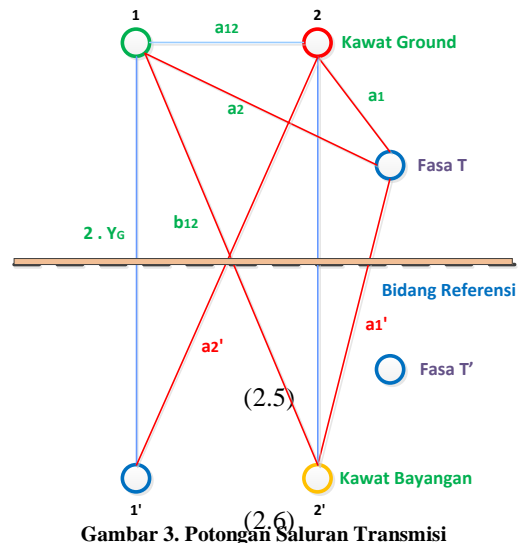
Impedansi surja bersama dari dua kawat tanah adalah :

$$Z_{12} = 60 \cdot \ln \left(\frac{b_{12}}{a_{12}} \right) \quad (5)$$

dimana :

Z_{12} = impedansi surja antara kawat tanah 1 dan 2

b_{12} = jarak dari kawat tanah 1 dan kawat tanah 2



Gambar 3. Potongan Saluran Transmisi

Gambar 3. memperlihatkan potongan saluran transmisi beserta letak kawat dan bayangannya. Sedangkan impedansi surja ekuivalen dari dua kawat tanah yang tidak identik adalah (Karnoto, 2003):

$$Z_s = \frac{Z_{11} + Z_{22} + Z_{12}}{4} \quad (6)$$

dimana :

Z_s = impedansi surja ekuivalen dari dua kawat tanah

Z_{11} = impedansi surja sendiri kawat tanah 1 (ohm)

Z_{12} = impedansi surja bersama kawat tanah 1 dan 2

Z_{22} = impedansi surja sendiri kawat tanah 2 (ohm)

Untuk menghitung besarnya impedansi surja menara, digunakan model pendekatan dari sargent dan darveniza yang disesuaikan dengan bentuk menara.

Dengan melihat bentuk menaranya, besarnya impedansi surja menara dihitung dengan menggunakan persamaan (Kim 2010) :

$$Z_T = 30 \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (7)$$

Dimana :

Z_T = impedansi surja menara (ohm)

h = tinggi menara (ohm)

r = jari-jari dasar menara (m)

2. Metode Penelitian

Data yang dibutuhkan dalam pembuatan *software* ini adalah data yang berkaitan dengan saluran udara tegangan ekstra tinggi, adapun data yang dimaksud adalah (Pottonen 2011):

- Konfigurasi menara saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 kV
- Andongan rata-rata kawat fasa dan tanah
- Tahanan rata-rata menara
- Panjang isolator gantung
- Diamater kawat fasa dan tanah
- Panjang saluran

Data-data tersebut merupakan data yang diperoleh dari kantor Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi Surabaya dan Ungaran Semarang.

Tabel 1. Koordinat Menara dan Radius Konduktor masing-masing fasa

NO	Line	Koordinat		Radius	Bundle
		X (m)	Y (m)		
1	R	10,10	58,5	1,02	45
2	S	10,90	45	1,02	45
3	T	12,10	31,5	1,02	45
4	R'	-10,10	58,5	1,02	45
5	S'	-10,90	45	1,02	45
6	T'	-12,10	31,5	1,02	45
7	G	7,80	69,5	0,8	-
8	G'	-7,80	69,5	0,635	-

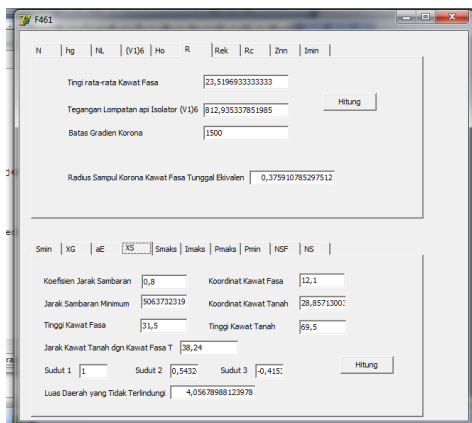
Tabel 2. Hasil Analisa Kegagalan Perlindungan (Shielding Failures) dengan Metode 2 Titik

NO	Hasil Pengujian	Nilai
1	Jumlah sambaran ke tanah	9,72
2	Tinggi rata-rata kawat tanah	62,76
3	Jumlah sambaran ke saluran	369,32
4	Tegangan Lompatan Api isolator pada	2563,18
5	Tinggi rata-rata kawat fasa	23,51
6	Radius sampul korona kawat fasa tunggal ekuivalen	0,35
7	Radius kawat fasa tunggal ekuivalen	0,19
8	Radius sampul korona kawat tunggal	0,54
9	Impedansi surja sendiri kawat fasa	274,84
10	Arus sambaran minimum terjadinya kegagalan perlindungan	18,38
11	Jarak sambaran minimum	53,07
12	Koordinat X kawat tanah untuk perlindungan efektif	6,26
13	Sudut perlindungan efektif	-9,35
14	Lebar daerah yang tidak terlindungi	4,77
15	Jarak sambaran maksimum	68,93
16	Arus sambaran maksimum terjadinya kegagalan perlindungan	27,47
17	Probabilitas melebihi arus sambaran minimum	0,57
18	Probabilitas melebihi arus sambaran maksimum	0,79
19	Jumlah gangguan karena kegagalan perlindungan pada satu sisi	0,51
20	Jumlah gangguan total karena kegagalan perlindungan	1,02

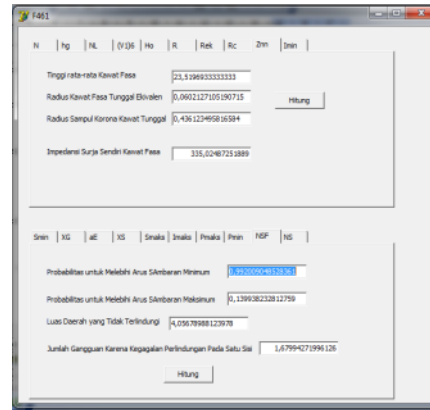
Tabel 3. Pengujian Lompatan Balik (Back Flashover)

NO	Langkah Perhitungan	Hasil	Fasa		
			R	S	T
1	Juml. Samb. Petir ke menara	220,98	-	-	-
2	Tegangan lompatan api isolator 2 μs (kV)	3601,09	-	-	-
3	Tegangan lompatan api isolator 6 μs (kV)	2563,18	-	-	-
4	Radius sampul korona kawat tanah (ohm)	0,87	-	-	-
5	Impedansi surja sendiri kawat tanah 1 (Ohm)	420,65	-	-	-
6	Impedansi surja sendiri kawat tanah 2 (Ohm)	415,73	-	-	-
7	Impedansi surja bersama 2 kawat tanah (ohm)	131,60	-	-	-
8	Impedansi surja ekuivalen 2 kawat tanah (ohm)	241,99	-	-	-
9	Faktor kopling terhadap kawat fasa n	-	0,47	0,33	0,23
10	Impedansi surja menara (ohm)	175,95	-	-	-
11	Waktu rambat dari puncak ke dasar menara μs	0,23	-	-	-
12	Waktu rambat ke menara terdekat (μs)	1,31	-	-	-
13	Waktu rambat dari puncak ke lengan n (μs)	-	0,01	0,06	0,10
14	Impedansi rangkaian	71,69	-	-	-

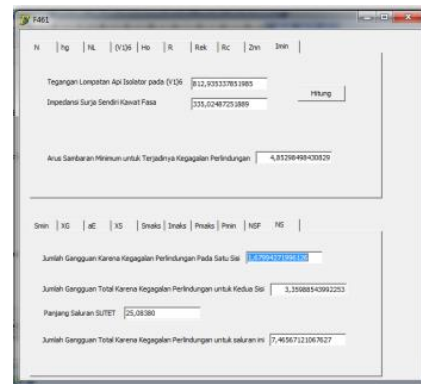
	instrinsik (ohm)				
15	Impedansi gelombang menara (ohm)	57,25	-	-	-
16	Faktor redaman	0,18	-	-	-
17	Faktor refraksi tahanan kaki menara	0,01	-	-	-
18	Tegangan pada puncak menara 2 μ S (kV)	22,12	-	-	-
19	Tegangan pantulan 2 μ S (kV)	0	-	-	-
20	Tegangan total pada puncak 2 μ S (kV)	22,12	-	-	-
21	Tegangan pada tahanan kaki menara 2 μ S (kV)	1,39	-	-	-
22	Tegangan lengan n pada 2 μ S (kV)	-	21,2	16,7	13,1
23	Tegangan surja isolator fasa n 2 μ S (kV)	-	10,8	9,41	8,01
24	Tegangan pada puncak menara 6 μ S (kV)	1,57	-	-	-
25	Tegangan pantulan 6 μ S (kV)	-0,03	-	-	-
26	Tegangan surja isolator fasa n 6 μ S (kV)	-	0,81	1,03	1,18
27	Arus sambaran kritis isolator fasa n 2 μ S (kA)	-	333,12	382,68	449,57
28	Arus sambaran kritis isolator fasa n 6 μ S (kA)	-	3164	2488	2172
29	Arus sambaran kritis minimum (kA)	-	333	382	449
30	Tegangan lompatan api isolator (kV)	3601,09	-	-	-
31	Persentase waktu dominan (%)	-	74,89	25,11	0
32	Arus sambaran kritis rata-rata (kA)	-	323	348	0
33	Probabilitas melebihi arus sambaran kritis	-	0,00	0,00	-
34	Juml. Samb. Menara per fasa (/100km/tahun)	-	165,49	55,48	-
35	Juml. Lompatan balik total (/100 km/tahun)	0,46	-	-	-
	Juml. Gangguan total akibat sambaran petir secara langsung		1,48		



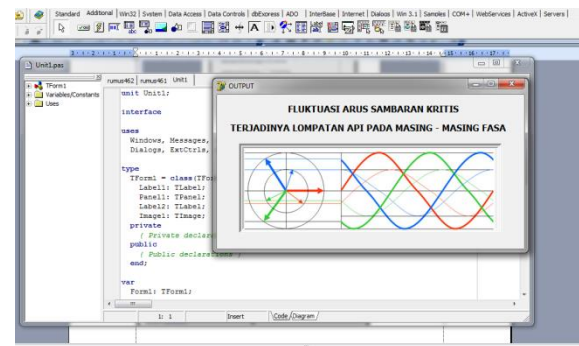
Gambar 4. Form Pencarian Luas Daerah Yang Tidak Terlindungi Dari Sambaran Petir



Gambar 5. Form Hasil Pengujian Jumlah Gangguan Karena Kegagalan Perlindungan Pada Satu Sisi



Gambar 6. Form Jumlah Gangguan Total Karena Kegagalan Perlindungan Pada Saluran Udara



Gambar 7. Hasil Output Pengujian Fluktuasi Kritis Terjadinya Lompatan Api Pada Masing – Masing Fasa

3. Kesimpulan

- Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa fluktuasi hasil sambaran kritis untuk terjadinya lompatan api pada masing-masing fasa, fasa R sebagai referensi mempunyai waktu dominan yang paling besar yaitu 74,89 % dan diikuti fasa S 25,11 %, hal ini dikarenakan fasa R yang paling dekat dengan kawat

tanah dan mempunyai faktor kopling yang paling besar sehingga fasa R ini akan mengalami *flashover* pertama kali yang pada akhirnya jika isolator tidak dapat menahan besarnya arus yang mengalir maka akan mengakibatkan pemutusan pada saluran SUTET

- Tingkat keandalan pada metode ini cukup tinggi yaitu hampir 100%, perbedaannya terletak pada angka keluar yang terdapat pada aplikasi lebih besar yaitu 0,34123/23,093 km dibandingkan dengan keadaan di lapangan 0,228/23,093 km dengan waktu pemutusan yang sangat singkat 72 ms

DAFTAR PUSTAKA

-
- Alvarado, Fernando. dan Oren, Shmuel. 2008. *Transmission System Operation and Interconnection*. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
- Brown, Ryan. (ed). 2012. *Reliability Enhancement of The Avista Electric Power System*. Gonzaga University, Spokane.
- Ditjen Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral. 2010. *Aturan Jaringan Jawa-Madura-Bali*. Jakarta.
- Hutauruk, T.S. 2009. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta : Erlangga
- Karnoto, Tarsiah S. Hardiono, Agung Warsito, 2003, *Sosialisasi dan Evaluasi diri Konservasi Energi Universitas Diponegoro tahun 2003*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Kim, Hyungchul. 2010. *Evaluation of Power System Security and Development of Transmission Price Method*. A Dissertation, Texas A&M University.
- Marsudi, Djiteng. 2005. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Balai Penerbit dan Humas ISTN, Jakarta.
- Pottonen, Liisa. 2011. *A Method for The Probabilistic Security Analysis of Transmission Grid*. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology.
- Siti, Saodah. 2011. *Evaluasi Keandalan sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan SAIDI dan SAIFI*. Seminar Nasional Aplikasi dan Teknologi 2011.
- Sommerville, I., 2008. *Making Ethnography Accessible: Bridging Real-World Experience to HCI Designers and Software Engineers*. Computing Department, Lancaster University, UK.
- Wiwied., 2011. *Evaluasi Keandalan Sistem Tenaga Listrik Pada Jaringan Distribusi Primer Tipe Radial Gardu Induk Blimbing*.
- Yeu, Rodney. 2008. *Post-Contingency Equilibrium Analysis*. IEEE Toronto Centennial Forum on Reliable Power Grids in Canada.