

ANALISA STABILITAS GENERATOR SEREMPAK MENGHADAPI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Sunu Hasta Wibowo ¹⁾, Puhrani B ²⁾, Saifulah ³⁾, M. Ali Watoni ⁴⁾

email: sunuhastawibowo@poliban.ac.id

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin

Ringkasan

Sistem tenaga listrik adalah kumpulan atau gabungan dari komponen – komponen atau alat – alat listrik yang saling berhubungan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu system. Selama sistem itu beroperasi, kestabilan sistem harus dipertahankan untuk menjaga pelayanan secara terus menerus kepada beban. Didalam studi stabilitas sistem daya khususnya untuk periode peralihan pusat perhatian terletak pada kemampuan kerja sama antara mesin-mesin pembangkit pada sistem tenaga listrik dalam menghadapi perubahan atau gangguan yang terjadi. Kerja sama diperlukan dalam menghadapi perubahan atau gangguan sistem adalah penyaluran daya antara mesin-mesin pembangkit. Untuk menganalisa kestabilan ini dilakukan melalui perhitungan stabilitas transien bagi gangguan-gangguan yang terjadi, dalam hal ini hanya merencanakan pada kestabilan peralihan bagi gangguan-gangguan saluran 2 fasa ketanah, melalui perhitungan stabilitas transien. dengan menggunakan analisa Metode Kriteria Sama Luas Dari perhitungan stabilitas transien ini dapat diketahui nilai perubahan-perubahan sudut operasi dari generator untuk mempertahankan sinkronisasi antara sudut $\delta = 21,30$ dan $\delta = 66,60$. dan waktu kecepatan rele untuk memutuskan rangkaian dapat ditetapkan pada $t = 0,25$ sec, apabila pada waktu ditetapkan rangkaian tidak segera diputuskan maka sistem akan kehilangan kestabilan.

Kata Kunci : Stabilitas, Kriteria sama luas, gangguan

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik adalah kumpulan atau gabungan dari komponen – komponen atau alat – alat listrik yang saling berhubungan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem, peralatan-peralatan listrik yang dimaksud adalah; Generator, Transformator, bus-bar, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban.

Selama sistem itu beroperasi, kestabilan sistem harus dipertahankan untuk menjaga pelayanan secara terus menerus kepada beban.

Dalam hal ini stabilitas atau kestabilan transien tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem itu sendiri untuk kembali bekerja normal setelah mengalami suatu gangguan, sebaliknya ketidak stabilan berarti kehilangan *sinkronisme* dari sistem.

Untuk menganalisa kestabilan ini dilakukan melalui perhitungan stabilitas transien bagi gangguan-gangguan yang terjadi, adapun gangguan-gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah:

- Gangguan hubung singkat antar-fasa
- Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah
- Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

Dari perhitungan stabilitas transien ini dapat diketahui nilai perubahan-perubahan sudut daya generator serempak selama terjadi gangguan, sehingga nantinya dapat diketahui pula waktu pemutusan kritisnya (*critical time clearing*) dari gangguan yang terjadi, dimana waktu pemutusan kritis ini adalah waktu pemutusan standar bagi relai pengaman untuk pemutusan jaringan yang mengalami gangguan, adapun Metode analisa yang digunakan untuk menyelesaikan kestabilan ini adalah menggunakan Metode Kriteria Sama Luas.

Adapun tujuan dari penelitian adalah untuk menentukan sudut operasi generator dalam mempertahankan sinkronisasi bila terjadi gangguan, dalam hal ini hanya pada gangguan hubung singkat 2 fasa ketanah, sehingga nantinya dapat menentukan waktu pemutusan jaringan oleh relai pengamannya.

2. KAJIAN PUSTAKA

Persamaan Ayunan

Jika momen puntir yang disebabkan oleh gesekan, gulungan dan rugi-rugi inti dari suatu mesin tidak ditinjau, setiap selisih antara momen poros dengan momen elektromagnetik yang ditimbulkan menyebabkan percepatan atau perlambatan mesin itu, jika T_s mewakili momen poros dan T_e momen elektromagnetik, dan jika nilai momen ini dipandang positif untuk suatu generator yaitu dengan memasukkan mekanis pada poros dengan momen keluaran listrik yang ditimbulkan, momen yang menyebabkan percepatan itu adalah :

$$T_a = T_s - T_e \dots\dots\dots (1)$$

Dimana;

T_a = momen percepatan

T_s = momen poros

T_e = Momen elektromagnetis

Dan T_a positif menyatakan percepatan, bila T_s lebih besar dari T_e , maka persamaan berlaku untuk daya percepatan itu adalah:

$$P_a = P_e - P_s \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

P_a = daya percepatan

P_e = daya listrik yang dibangkitkan

P_s = daya poros

Bentuk-Bentuk Kestabilan.

Kestabilan merupakan salah satu persoalan perencanaan operasi dalam sistem tenaga. Gangguan-gangguan pada operasi sistem tenaga dapat berupa perubahan-perubahan kecil dan berangsur-angsur menjadi besar atau besar dan mendadak, dari ancaman gangguan inilah maka studi kestabilan dikelompokkan menjadi studi kestabilan keadaan mantap dan kestabilan keadaan peralihan (transien).

Kestabilan Keadaan Mantap.

Kestabilan keadaan mantap merupakan kemampuan suatu system tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi, ketika system itu mengalami perubahan-perubahan kecil dan berangsur-angsur menjadi besar.

Penyelesaian-penyelesaian masalah kestabilan keadaan mantap meliputi kestabilan suatu system terhadap perubahan-perubahan kecil disekitar titik kesetimbangan.

Kemudian langkah berikutnya apakah mesin tersebut akan tetap dalam keadaan sinkron setelah terjadi perubahan kecil dari titik kerjanya.

Rangkaian setara jala-jala antara ggl pada suatu sistem dengan dengan dua mesin dipandang suatu jala-jala dua pasang kutub sederhana. Tegangan ujung pengirim untuk keadaan tetap adalah tegangan keluaran generator sinkron, dan tegangan pada ujung penerimanya pada motor sinkron. Daya yang dipindah dari generator sinkron ke motor sinkron adalah:

$$P_{maks} = \frac{E_g E_m}{X} \sin \delta \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

E_g = tegangan generator

E_m = tegangan motor

X = nilai reaktansi generator dengan ril

Kestabilan Transien

Kestabilan Transien merupakan kemampuan suatu system tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi, ketika system itu mengalami perubahan-perubahan besar dan mendadak. Kondisi abnormal yang timbul pada system tenaga harus dijaga untuk mencegah kerusakan pada peralatan.

Pada kondisi normal generator-generator tersebut berputar pada kecepatan sinkron. Ketika terjadi hubung singkat untuk seketika pengiriman daya mekanik dari penggerak mula tetap, sedangkan keluaran listrik pada generator kecil.

Disini daya mekanik melebihi daya listrik sehingga cenderung mempercepat rotor dan apabila gangguan tersebut tidak terselesaikan dengan baik maka hal ini mengakibatkan ketidak seimbangan pada sistem. Sebelum pembahasan sampai pada metode penyelesaian, maka terlebih dahulu diawali dengan sifat mekanis yang mewakili mesin-mesin dalam system. Karena setelah gangguan mesin-mesin itu harus mengatur sudut rotornya karena ada perubahan daya.

Tenaga kinetic suatu benda yang berputar adalah:

$$K_e = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad \text{joule} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dimana I momen inersia dan ω kecepatan sudut (rad/det), maka konstanta kelembaman H, yaitu besar tenaga kinetik yang tersimpan (pers 5).

$$H = \frac{2,3,14 \cdot n}{60} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

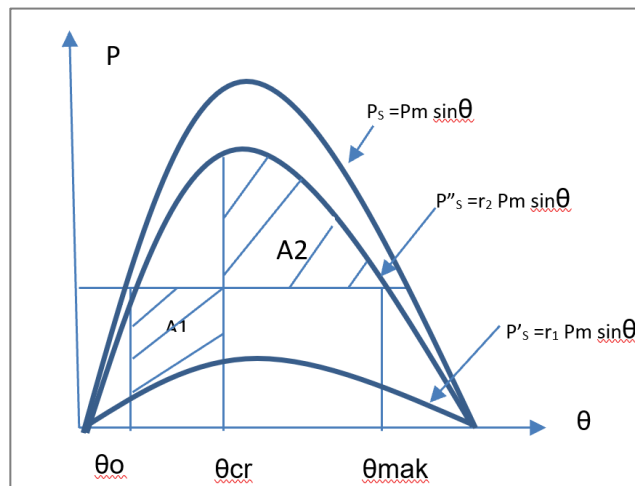
Jenis penelitian yang diterapkan oleh penulis adalah penelitian kuantitatif deskriptif, dengan menggunakan pendekatan studi kasus yakni mengenai perhitungan anggaran laba rugi. Penelitian kuantitatif deskriptif bertujuan untuk menjelaskan kondisi yang menjadi objek penelitian ini berdasarkan apa yang terjadi.

Metode analisa yang digunakan untuk menyelesaikan kestabilan adalah menggunakan Metode Kriteria Sama Luas.

Untuk menganalisa keadaan stabilitas karena hubung singkat yang kemudian ditiadakan diperlukan tiga diagram daya sebagai fungsi sudut, yaitu :

- a. Kondisi sebelum terjadi gangguan
- b. Kondisi selama gangguan
- c. Kondisi setelah ganggua

Metode Kriteria Sama luas ditunjukkan Gambar 1



Gambar 1. Metode Kriteria Sama Luas

P_s = daya yang dapat disalurkan

P'_s = daya yang dapat disalurkan saat gangguan

P''_s = daya yang dapat disalurkan setelah gangguan

Metode Kriteria Sama Luas secara matematis ditunjukkan pada pers 6 dan pers 7

$$\text{Luas A1} = P_m (\theta_{cr} - \theta_o) - \int_{\theta_o}^{\theta_{cr}} P'_s d\theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Luas A2} = \int_{\theta_{cr}}^{\theta_{maks}} P''_s d\theta - P_m (\theta_{maks} - \theta_{cr}) \dots\dots\dots (7)$$

Pada saat $\theta = \theta_{cr}$ maka sudut θ_{cr} disebut sudut penghapusan kritis karena merupakan nilai maksimum yang mungkin untuk menghapuskan gangguan tanpa melebihi batas kestabilan perlahan. Dengan memeriksa gambar 1. menunjukkan bahwa jika penghapusan itu terjadi pada suatu nilai θ yang lebih besar dari θ_o , sehingga luas A2 diatas garis mendatar akan lebih kecil dari A1 dibawah garis itu, dan θ akan terus meningkat kembali daya mekanis masukan generator akan lebih besar dari pada daya listrik yang dibangkitkan.

Kelanjutan akan meningkatkan lebih jauh dan generator itu dapat mempertahankan kembali keserempakannya. Besar daya yang disalurkan selama gangguan sangat mempengaruhi nilai A1, jika

r1 lebih kecil gangguan yang terjadi akan lebih besar terhadap sistem itu, karena r1 yang rendah berarti daya yang disalurkan kecil sehingga A1 lebih besar. Dengan menyamakan pernyataan-pernyataan untuk A1 dengan A2 sehingga diperoleh seperti pers 8 berikut :

$$\Phi_{cr} = \cos^{-1} \sqrt{\frac{\left(\frac{P_m}{P_{mak}}\right)(\Phi_{mak} - \Phi_o)}{r_2 - r_1} + \frac{r_2 \cos \Phi_{mak} - r_1 \cos \Phi_o}{r_2 - r_1}} \dots \dots \dots (8)$$

Dimana Φ_{cr} adalah sudut pemutusan kritis

Untuk waktu pemutusan kritis, ditunjukkan seperti pers 9 berikut:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4.H(\Phi_{cr} - \Phi_o)}{s.P_m}} \dots \dots \dots (9)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelesaian Step By Step

Kriteria sama luas untuk memahami suatu sistem dua mesin, tetapi untuk mencari waktu pemutusan kritis disini harus θ sebagai fungsi t, θ dapat dituliskan terhadap t untuk suatu mesin guna mendapatkan lengkung ayunan mesin tersebut.

Sudut θ dihitung sebagai fungsi waktu dalam selang yang cukup panjang guna menentukan apakah θ akan meningkat tanpa batas atau mencapai sudut maksimum dan mulai berkurang kembali meskipun hasil akhir menunjukkan kestabilan dengan menentukan lengkung untuk berbagai waktu penghapusan panjang waktu yang diijinkan sebelum menghilangkan suatu gangguan dapat ditentukan. Waktu penyela standar untuk pemutusan rangkaian dengan rele-releanya, setelah timbulnya suatu gangguan sehingga kelajuan rangkaian dapat ditetapkan.

Dalam metode untuk perhitungan tangan perubahan kedudukan sudut rotor selama suatu selang waktu yang pendek dihitung dengan pengandaian-pengandaian berikut :

- a. Daya pemercepat Pa yang dihitung pada awal selang adalah konstan dari pertengahan selang sebelumnya ke pertengahan selang yang ditinjau.
- b. Kecepatan sudut konstan untuk keseluruhan setiap selang pada nilai yang dihitung pada pertengahan selangnya.

Daya percepatan dihitung untuk titik-titik yang dilingkari dari interval yang ke n-2 sampai n. Pengandaian Pa adalah konstan diantara titik-titik ketengah interval. Demikian pula r yaitu kelebihan kecepatan sudut terhadap kecepatan sinkron yang mempunyai konstan. Perubahan kecepatan ini merupakan hasil antara percepatan dan interval waktu, sehingga didapat.

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \frac{P_{a(n-1)} \cdot t^2}{M} \dots \dots \dots (10)$$

Persamaan (10) merupakan persamaan yang penting dalam penyelesaian langkah demi langkah untuk persamaan ayunan dengan pengandaian-pengandaian diperlukan yang telah diuraikan itu, karena penyelesaian itu menunjukkan bagaimana cara menghitung perubahan θ selama suatu selang, jiks perubahan θ untuk selang sebelumnya dan daya pemercepat untuk selang yang ditinjau diketahui.

Data Sisi Kirim

Misalkan dua generator, masing-masing 4 Mw, 0,9 pf, 3 Φ , 50 hz dan 375 rpm.

- a. Reaktansi sinkron $x_d = 1,0 \%$
- b. Reaktansi transien $x'd = 0,19 \%$
- c. Reaktansi ukuran negatif = 0,23

Transformator 10/13, 3/16, 6 MVA, 3 Φ , 50 hz dengan reaktansi 7 %

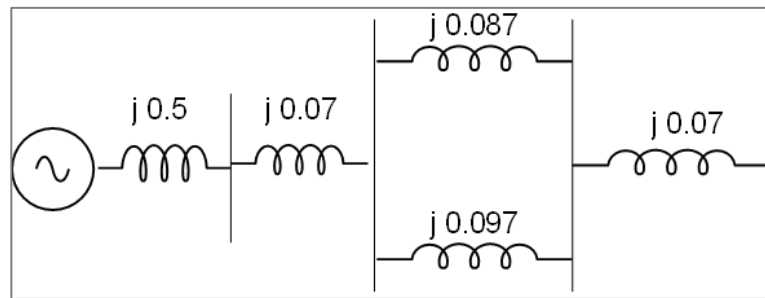
Dua jaringan listrik paralel, luas penampang 157,2 mm², jarak konduktor dari pusat ke pusat 3700 mm, jarak horizontal line 2200 mm, daya maksimum 16 MW dengan factor daya 0,9 leading, tegangan nominal 69 KV.

Tegangan rendah transformator sisi terima dihubungkan ke ril tak terhingga, tegangannya dipertahankan konstan 95 %.

Stabilitas Transien

Pada perhitungan stabilitas transien ini perlu memperhatikan daya maksimum generator sinkron dihubungkan ke sistem.

Daya maksimum yang diberikan oleh mesin tersebut adalah :



Gambar 2. Diagram Impedansi

$$P_{mak} = \frac{E_t \cdot E_d}{X_d} \sin \theta$$

Stabilitas Transien Untuk Dua Generator

Stabilitas transien pada sistem daya, harus mampu kenaikan beban secara tiba-tiba atau terjadinya hubung singkat sehingga mengakibatkan tidak sinkronnya generator tersebut.

Percepatan daya dari mesin sinkron tergantung kondisi operasi normal, dan besarnya adalah perbedaan antara daya input dan daya *out put*.

$$P_a = P_m - P_e \dots\dots\dots 9$$

Kondisi Sebelum Gangguan

$$P_s = - \frac{E_s \cdot E_r}{X_d} \cos (90 + \theta)$$

$$= - 2,45 \cos (90 + \theta)$$

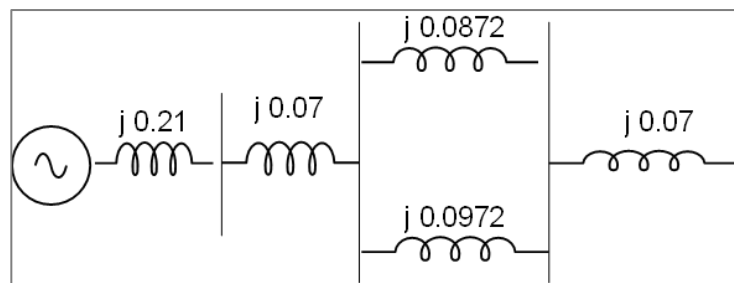
Kondisi Sebelum Gangguan (DL – G)

$$G - F = \frac{(j 0,26+j0,07)(j0,0436) + j0,07}{j 0,26+j0,07+j0,0436+j0,07}$$

$$= j 0,0846 \text{ (urutan negatif)}$$

$$G - F = j 0,05767 \text{ (urutan nol)}$$

$$G - F = j 0,0343 \text{ (urutan positif)}$$



Gambar 3. Jaringan Urutan Negatif, Nol, Positif

Kondisi Setelah Gangguan Dipisahkan

$$d = j 0,4372$$

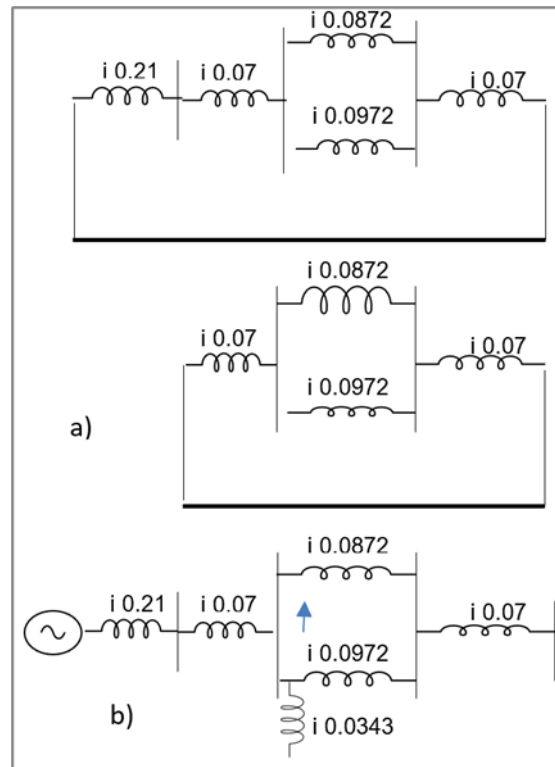
$$P''_s = - \frac{E'_s \cdot E_r}{X''_d} \cos (90 + \theta)$$

$$= - 2,2 \cos (90 + \theta)$$

Diagram Sudut Daya Dan Batasan Sudut

$$\theta_o = - \frac{E'_s \cdot E_r}{X''_d} \cos (90 + \theta)$$

$$= 0,73 \text{ rad}$$



Gambar 4. Setelah Jaringan dipisahkan

Besar sudut daya setelah gangguan dipisah,

$$\theta_o = \sin^{-1} \frac{0,888}{2,2} 156,2^\circ$$

$$= 2,73 \text{ rad}$$

- a) Urutan negatif
- b) Urutan nol
- c) Urutan positif

Maka:

$$\text{Luas } A1 = 0,888 \theta_{cr} - 0,68 - 0,73 \cos \theta_{cr}$$

$$\text{Luas } A2 = 2,2 \cos \theta_{cr} - 0,42 - 0,888 \theta_{cr}$$

Syarat kestabilan pada sistem daya, luas A1 (energi pemercepat) harus lebih kecil atau sama dengan A2 (energi perlambatan)

$$A1 \leq A2$$

Sehingga menghasilkan :

$$\theta_{cr} = 66,66^\circ$$

Dimana θ_{cr} adalah sudut penghapusan kritis dari sini dapat diperoleh waktu penghapusan kritis yang berupa waktu untuk mesin berayun dari kedudukan asalnya ke sudut penghapusan kritis itu.

Sudut Waktu

Menentukan waktu memisahkan gangguan, dihitung mulai dari sudut $\theta = 66,66$ dengan menggunakan metode step by step. Dimana sudut θ sebagai fungsi waktu.

MVA = 8,888 dan WR = 105,000 lb-ft diperoleh

$$H = \frac{0,23 \cdot 10 \cdot n}{MVA}$$

$$= 3,32 \text{ KW sec/KVA}$$

$$= \frac{108 \cdot f}{H \cdot KVA} = 2,711$$

Untuk menentukan sudut waktu, digunakan perhitungan dengan metode step by step seperti berikut :

$$\theta_o = 21,3^\circ$$

Daya yang dikirim selama gangguan (pe)

$$P_e = 0,73 \sin \theta$$

$$= 0,265 \text{ pu}$$

Oleh karena itu,

$$P_a = 0,888 - 0,265 = 0,623 \text{ pu}$$

$$\text{Nilai Rata-rata } P_a = \frac{0,623}{2} = 0,31 \text{ pu}$$

Maka :

$$M = \frac{0,888 \cdot 3,32}{180,50} = 0,327$$

Untuk selang waktu $t = 0,05 \text{ s}$

$$\frac{(t)^2}{M} \cdot P = 7,03 \cdot 0,31 = 2,109$$

$$\theta_n = 0 + 2,11 = 2,11^\circ$$

$$\theta_n = 21,3^\circ + 2,11^\circ = 23,41^\circ$$

Bila $t = 0,10 \text{ s}$

$$P = 0,888 - 0,73 \sin 23,41^\circ = 0,59 \text{ pu}$$

$$\frac{(t)^2}{M} \cdot P = 7,03 \cdot 0,59 = 4,06$$

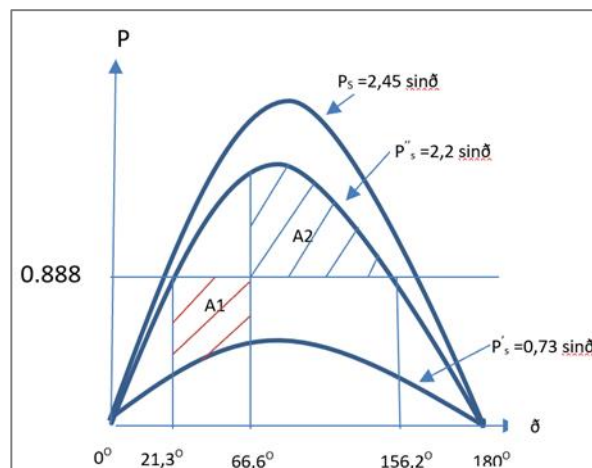
$$\theta_n = 2,11 + 4,06 = 6,17^\circ$$

$$\theta_n = 23,41 + 6,17 = 29,57^\circ$$

Hasil perhitungan interval waktu selanjutnya, dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1. Perhitungan Step by Step Untuk Gangguan Yang Dihapuskan Pada $T = 0,25 \text{ s}$

Ts	θ_0	Pe	Pa	$\Delta\theta_n$	θ_n
0,00	21,30	0,265	0,623	2,11	23,41
0,05	23,41	0,290	0,598	6,16	29,57
0,10	29,57	0,360	0,528	9,74	39,30
0,15	39,30	0,462	0,426	12,62	51,92
0,20	51,92	0,575	0,313	14,75	66,66
0,25	66,66	0,670	0,218	16,22	82,88
0,30	82,88	0,724	0,164	17,33	100,68
Gangguan dihapus pada $T = 0,25 \text{ s}$					
0,25	66,66	2,00	-1,112	11,73	78,39
0,30	78,39	2,154	-1,267	3,14	81,53
0,35	81,53	2,176	-1,288	-5,88	75,91
0,40	75,91	2,134	-1,246	-14,03	61,91



Gambar 5 Grafik Lengkung sudut Daya

5. KESIMPULAN DAN SARAN-SARAN

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa :

- Sudut operasi dari generator untuk mempertahankan sinkronisasi antara sudut $\theta = 21,3^\circ$ dan $\theta = 66,6^\circ$
- Dengan telah diketahui nilai-nilai perubahan sudut daya generator selama gangguan diisolir dapat diketahui sehingga kecepatan rele untuk memutuskan rangkaian dapat ditentukan pula

- c. Waktu pemutusan kritis ditetapkan pada $t = 0,25$ sec apabila pada waktu ditetapkan rangkaian tidak segera diputuskan maka sistem akan kehilangan kestabilan.

Saran

Didalam melaksanakan penelitian untuk mencapai hasil yang diharapkan, maka disarankan untuk melakukan terhadap dua generator paralel atau kelipatan.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Asosiasi Propesionalis Elektrikal, 2007, Uji Keahlian Bidang Teknik Tenaga Listrik.
2. Abdul Kadir, 1982, ENERGI, Penerbit Universitas Indonesia.
3. Frank D Petruzella, 2001, Elektronik Industri, Penerbit Andi Yogyakarta
4. Joko Achyanto, 1997, Mesin-Mesin Listrik, Penerbit Erlangga.
5. IEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power Sytem Stability Analyses
6. I Gede Yogi Aditya Dewantara, Irrine Budi Sulistiawati. Analisis stabilitas transient pada sistem 150 kV bali dengan penambahan pltu celukan bawang 150 kV
7. Jurnal EECCIS Vol. 14, No. 3, Desember 2020 pp 132-139
8. Analisis Transient Stability Gangguan Short Circuit 3 Phase Dan Generator Trip Pada Sub Sistem Paiton Dan Grati