

Simulasi Dinamika untuk Menentukan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Menggunakan *Thyristor Controlled Braking Resistor* pada Sistem *IEEE 34 Node Test Feeder*

Andi Taufiq, Mochamad Ashari dan Ontoseno Penangsang

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ontosenop@ee.its.ac.id, ashari@ee.its.ac.id

Abstrak—Terdapat berbagai macam metode untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik. Salah satunya adalah dengan menggunakan metode pengereman dinamis (*dynamic braking*). Generator sinkron sebagai *distributed generator* yang digerakkan oleh mesin diesel. Pada saat terjadi gangguan pada sistem, digunakan sebuah *Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR)* untuk meredam osilasi yang terjadi. Sistem yang hendak dianalisis dinamika dan stabilitasnya adalah *IEEE 34 node test feeder*. Dengan sistem ini diilustrasikan karakteristik dan keefektifan *TCBR* untuk meredam osilasi frekuensi rendah dan mencegah terjadinya ketidakstabilan transien sistem. Dari hasil analisis diperoleh bahwa dengan adanya penambahan *TCBR (Thyristor Controlled Braking Resistor)* maka respon transien sistem akan menjadi lebih baik. Hal ini ditunjukkan dengan adanya penurunan overshoot dan settling timenya. Dengan demikian sistem akan menuju kondisi stabil dengan lebih cepat setelah terjadi gangguan.

Kata Kunci— Sistem tenaga, mesin diesel, *TCBR*, dinamika dan stabilitas

I. PENDAHULUAN

SISTEM tenaga listrik terdiri atas sumber dan beban yang letaknya berjauhan dan meliputi daerah yang sangat luas serta pengiriman dayanya ke pusat-pusat beban dilakukan melalui jaringan transmisi dengan kapasitas yang terbatas. Pengoperasian yang demikian akan menyebabkan keadaan mantapnya dapat terganggu atau akan menimbulkan peredaman osilasi elektromekanik yang kurang baik dan kondisi yang paling buruk adalah sistem tenaga menjadi gagal.

Keluaran daya listrik generator akan menentukan apakah rotor akan mengalami percepatan, perlambatan atau tetap pada kecepatan serempaknya. Perubahan daya listrik ditentukan oleh keadaan jala-jala transmisi, distribusi dan beban yang terpasang pada sistem daya listrik tersebut. Jika pada jaringan listrik terjadi gangguan, akan menyebabkan daya keluaran daya listrik generator berubah dengan cepat yang akan menimbulkan peralihan elektromekanis. Selama periode gangguan ini daya yang dikonsumsi oleh beban akan mempengaruhi keseimbangan antara generator dengan beban,

sehingga dapat mempengaruhi simpangan sudut dan stabilitas ayunan sistem. Perubahan daya listrik ditentukan oleh persamaan aliran daya yang berlaku pada keadaan jaringan listrik dan bagi model yang dipilih untuk mewakili perilaku mesin tersebut. Persamaan aliran daya sendiri dipengaruhi oleh karakteristik beban yang dipasang pada sistem daya listrik [1].

Dari permasalahan diatas timbulah suatu ide untuk memanfaatkan *Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR)* untuk meredam osilasi yang terjadi ketika sistem mengalami gangguan. Dengan sistem ini diilustrasikan karakteristik dan keefektifan *TCBR* untuk meredam osilasi frekuensi rendah dan mencegah terjadinya ketidakstabilan transien sistem.

II. TEORI STABILITAS TENAGA LISTRIK DAN PERBAIKAN RESPON STABILITAS TRANSIENT

2.1 Pengertian Stabilitas [2]

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus dapat memenuhi 3 persyaratan utama dalam pengoperasiannya, yaitu: *reliability*, *quality*, dan *stability*. *Reliability* adalah kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standart yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi. *Stability* menurut pengertiannya adalah kemampuan alat untuk kembali kepada kondisi normal apabila terjadi gangguan.

Suatu sistem dikatakan memiliki stabilitas yang baik jika terkena gangguan sistem akan dapat kembali ke keadaan titik seimbangannya dalam kondisi tertentu, dan bila stabilitas dari sistem tidak baik maka setelah terjadi gangguan sistem tersebut tidak dapat kembali ke titik normalnya.

Dalam sistem tenaga listrik stabilitas dibagi menjadi tiga:

1. Stabilitas tunak (*steady-state stability*)
2. Stabilitas dinamik (*dynamic stability*)
3. Stabilitas peralihan (*transient stability*)

2.2 Perbaikan Respon Stabilitas Transien Sistem

Usaha-usaha yang dilakukan untuk memperbaiki respon stabilitas transien sistem tenaga listrik [3] antara lain:

2.2.1 Pengaturan Eksitasi

Peningkatan osilasi sistem ditanggulangi dengan memperbaiki sistem peredaman melalui pemakaian sinyal tambahan yang masuk pada eksiter generator. Pada saat ayunan pertama (*first swing*) dalam 0,5 detik atau kurang, generator tidak akan kehilangan sinkronisasi akibat kenaikan sudut rotornya. Dengan memaksa eksitasi pada batas tertingginya, tegangan terminal generator dipertahankan pada batas ratingnya, yang akan mempertahankan daya keluaran generator, mengurangi torsinya dan mengurangi ayunan pertama.

2.2.2 Fast valving

Salah satu metode pengurangan ayunan pada generator adalah dengan mengurangi energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin selama terjadi gangguan. Energi transien yang berlebihan ini akan dikurangi sehingga menghasilkan ayunan yang lebih kecil dengan kemungkinan yang lebih kecil terjadi kehilangan sinkronisasi. Metode ini dikenal dengan *fast valving* yang berkaitan dengan pengoperasian katub uap dalam waktu yang sangat singkat.

2.2.3 Kompensasi Seri

Daya listrik P_e yang disalurkan oleh saluran transmisi diberikan oleh:

$$P_e = \frac{EV}{X} \sin \delta \tag{1}$$

Dengan:

E : tegangan internal generator

V : tegangan sisi penerima

X : reaktansi seri total

Bila dianggap E dan V dipertahankan konstan, dan X diubah-ubah, maka daya yang disalurkan berbanding terbalik dengan X . Nilai X yang lebih rendah berarti amplitudo sudut daya menjadi lebih tinggi. Dengan demikian untuk daya awal tertentu, sudut akan menjadi lebih kecil dan kesanggupan saluran yang terganggu untuk mengubah energi kinetik transien yang besar (yang disebabkan oleh gangguan) menjadi energi potensial akan menjadi lebih besar. Jadi ayunan rotor pada generator akan menjadi lebih kecil dan kemampuannya untuk tetap sinkron dengan sistem yang lain menjadi lebih besar. Alasan yang sama menunjukkan bahwa nilai X yang lebih besar akan mempunyai efek yang berlawanan pada stabilitas transien generator.

2.2.4 Pengurangan Energi yang berlebihan selama transien

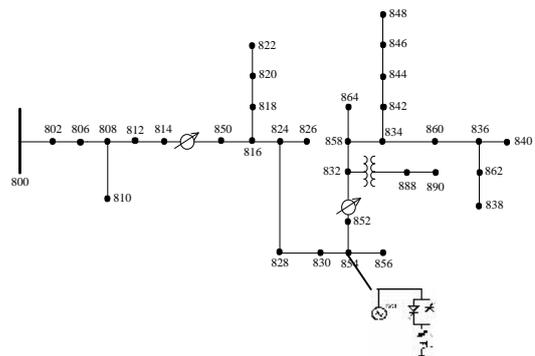
Metode ini menggunakan *braking resistor* yang digunakan pada situasi dimana daya yang besar disalurkan melalui saluran yang jumlahnya terbatas. Kehilangan sebagian dari salurannya mungkin akan mendorong terjadinya ketidakseimbangan energi yang serius yang mengakibatkan ayunan generator yang sangat besar dan kehilangan sinkronisasi. Pada bagian awal transien, generator dibebani dengan *resistor*, yang berlaku sebagai sebuah pengganti beban sistem. Kelebihan energi akan dikurangi, sehingga menghasilkan ayunan generator yang lebih kecil. Untuk menurunkan biaya, *braking resistor* digunakan untuk waktu yang sangat singkat dalam orde beberapa detik. Untuk

pengaturannya dapat menggunakan *thyristor* yang dikenal dengan *Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR)*.

III. PEMODELAN SISTEM

3.1 Perancangan Model Sistem Tenaga Listrik

Model dari sistem tenaga listrik yang digunakan adalah sistem IEEE 34 Node Test Feeders. Sistem tersebut terdiri dari sebuah *Substation dan distributed generator* yang mensuplai jala-jala yang sangat besar. Sistem *TCBR* dihubungkan ke sisi Generator melalui rangkaian *thyristor*. Gangguan diberikan pada sistem dengan gangguan 1 fasa, 2 fasa dan 3 fasa ke tanah, sehingga bisa di lihat gambar osilasi dari generator itu sendiri. Skema dapat dilihat pada gambar 1



Gambar 1 Skema simulasi IEEE 34 node test feeders

Sistem IEEE merupakan sistem yang dipakai di daerah Arizona, Amerika Serikat. Tegangan nominal feeder ini adalah 24.9 kV dan karakteristiknya adalah sebagai berikut :

1. Sangat panjang dengan beban ringan.
2. Terdapat trafo *step down* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 24.9 kV menjadi 4.16 kV
3. Beban yang tidak seimbang dengan beban “*Spot*” dan beban “*Distribusi*” diasumsikan terkoneksi pada pusat line pada *feeder*.
4. Terdapat kapasitor shunt.

Karena panjang dari feeder dan beban tidak seimbang, hal itu bisa membuat permasalahan seperti permasalahan konvergensi.[4]

3.2 Model Saluran Distribusi

Pada sistem ini terdapat beberapa konfigurasi *wiring* yang digunakan. Panjang saluran , *phasing* tiap saluran berbeda, tergantung jenis konfigurasi yang digunakan untuk setiap saluran distribusi antar *node*, seperti contohnya antara *node* 800 dan *node* 802, menggunakan konfigurasi 300 dengan jenis *Phasing* BACN, panjang 2580 feat, 3 phase 4 kabel.

Konfigurasi saluran distribusi pada IEEE 34 node test feeders bisa di lihat pada tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi kabel

Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing ID
		ACSR	ACSR	
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Tabel 2. Data panjang kabel

Line Segment Data			
Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	0	XFM-1
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	302
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

3.3 Model Gardu Induk.

Untuk pembangkit, menggunakan blok three phase source. Kapasitas daya untuk gardu induk ini sebesar 1000MVA pada

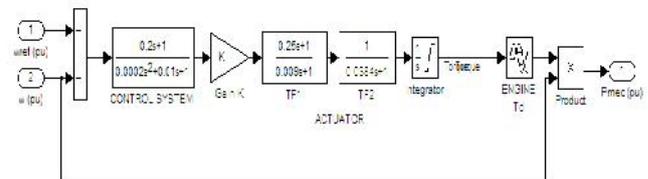
rating 24900 V. Kapasitas dari sumber ditentukan oleh batasan dari koneksi *grid* pada sistem distribusi.

3.4 Model Generator

Untuk generator, menggunakan blok mesin serempak. Blok mesin serempak ini dapat beroperasi sebagai motor atau generator. Mode operasi dari blok mesin ini ditentukan dari penandaan daya mekaniknya. Jika P_m positif maka mesin akan berfungsi sebagai motor sedangkan jika P_m *negative* maka mesin akan berfungsi sebagai generator.

3.5 Model Mesin Diesel

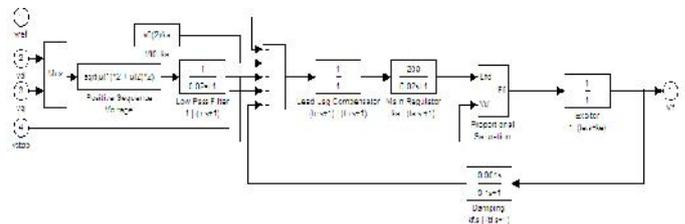
Sebuah mesin diesel digunakan untuk memutar generator sinkron. Model mesin diesel ditunjukkan pada gambar 2. Sinyal masukan adalah kecepatan dalam per unit dan keluarannya adalah sinyal kontrol P_{mech} generator sinkron.



Gambar 2. Diagram model governor dan mesin diesel.

3.6 Model Eksitasi

Nilai parameter-parameter dan ketentuan-ketentuan yang digunakan pada kotak dialog sistem eksitasi seperti diperlihatkan pada gambar 3 didapatkan dari file demo yang menggunakan sistem eksitasi.



Gambar 3. Model eksitasi generator sinkron

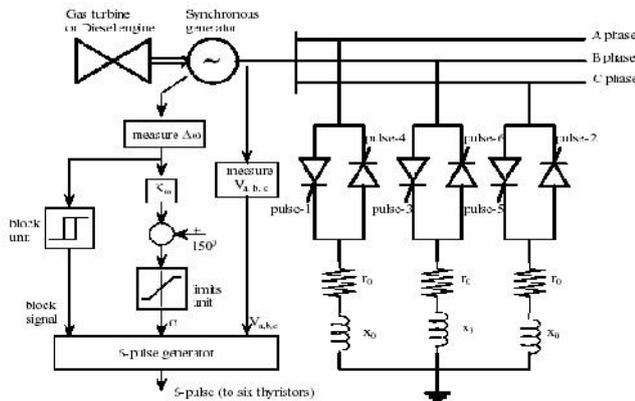
Pada gambar 3 sinyal masukan terdiri dari V_{ref} , V_d , V_q , V_{stab} , sedangkan sinyal keluaran adalah tegangan penguatan V_f yang akan dijadikan inputan untuk *Distributed generator* yang digunakan di sistem ini.

3.7 Konfigurasi TCBR

Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR) merupakan *braking resistor* yang elemen pengontrolnya berupa dua *thyristor* yang dipasang saling berlawanan secara paralel, yang memungkinkan penghantaran bolak-balik. Sebab kalau cuma satu *thyristor* saja, maka keluarannya akan bersifat searah. Tujuan pemakaian *TCBR* adalah untuk meredam osilasi bila sistem mengalami gangguan. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan sudut penyulutan pulsa (α) pada gerbang *thyristor*, yang berarti mengatur besar kecilnya arus yang mengalir pada resistor.

Apabila beban yang hilang karena gangguan adalah kecil, maka sudut penyulutan *thyristor* akan diperbesar sehingga arus yang mengalir akan lebih kecil sehingga daya aktif yang

diserap oleh *TCBR* akan diperkecil dan digunakan sistem untuk menggantikan kebutuhan daya aktifnya. Bila beban yang hilang akibat gangguan adalah besar, maka terjadi kelebihan daya aktif dari suplai, untuk itulah sudut penyulutan *thyristor* pada *TCBR* diperkecil, sehingga arus yang mengalir pada *TCBR* akan membesar.



Gambar 4. Diagram *TCBR* dan unit kontrolnya.

Rangkaian *thyristor* digunakan untuk pensaklaran keluar dan masuk dari sistem braking. *Thyristor* sendiri adalah komponen elektronika daya yang dapat berfungsi sebagai mekanisme pensaklaran yang mekanismenya diatur dengan memvariasikan sinyal pemicu pada gate *thyristor*. Selain itu *thyristor* dapat memberikan fungsi pensaklaran dengan phase control dimana dengan mengatur sudut penyalan (α) yang dapat diatur besarnya arus yang melalui *thyristor*.

Sebagai pensaklaran untuk sistem *braking*, penggunaan *thyristor* mempunyai keuntungan yaitu besarnya *braking* yang dimasukkan ke dalam sistem dapat ditentukan dengan menentukan besarnya sudut penyalan (α), sehingga dapat mencegah terjadinya *braking* yang berlebihan yang dapat mengakibatkan peredaman berlebihan (*overdamped*).

Prinsip kerja dari rangkaian pulse generator akan dijelaskan pada bagian berikut. Untuk menghasilkan sudut penyalan yang tepat bagi *thyristor* digunakan rangkaian *pulse generator*. Dalam rangkaian tersebut terdapat pembangkit gelombang segitiga yang telah disinkronisasi dengan tegangan saluran AC, kemudian gelombang segitiga yang telah disinkronisasi tersebut dikurangi dengan tegangan pengaturan *vcontrol* yang akan menghasilkan gelombang segitiga dengan nilai puncak yang berbeda-beda. Kemudian, gelombang segitiga tersebut akan melewati rangkaian logika dimana nilai keluaran akan bernilai 1 jika masukan lebih besar dari 0. Keluaran rangkaian logika tersebut akan berupa gelombang kotak (*square wave*) dengan waktu yang berbeda-beda yang akan menentukan besarnya sudut penyalan yang akan dihasilkan oleh rangkaian *pulse generator*.

Secara matematis, besarnya sudut penyalan (α) dapat diatur dengan menentukan besarnya nilai tegangan pengaturan ($V_{control}$) dan nilai puncak dari gelombang segitiga yang telah disinkronisasi.

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Umum

Model yang digunakan adalah model IEEE 34 *node test feeders* dari simulasi ini akan diperoleh beberapa parameter sebagai berikut:

- Penyulutan sudut *Thyristor*
- Tegangan Keluaran pada generator
- Deviasi kecepatan rotor pada generator
- Daya Mekanik Generator

Pengambilan data simulasi dilakukan dengan jenis gangguan yang digunakan yaitu gangguan *short circuit* 1 fasa ke tanah, 2 fasa ke tanah dan 3 fasa ke tanah. Perhatian utama pengamatan pada simulasi ini adalah tanggapan sistem atas gangguan yang dialami oleh sistem tersebut dengan cara membandingkan bila sistem tidak menggunakan *TCBR* dan system yang menggunakan *TCBR*.

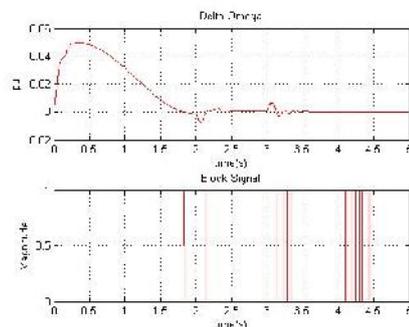
4.2. Sistem yang Hendak di Uji

Sistem yang hendak dianalisis terdiri atas sebuah Generator yang dihubungkan ke IEEE 34 *node test feeder* sebagai sistem uji. Generator yang dipasang menggunakan mesin diesel. Untuk perbaikan respon transien sistem pada saat mengalami gangguan maka digunakan *TCBR* yang dihubungkan ke terminal generator yang sebelumnya di pasang di transformator *step up*.

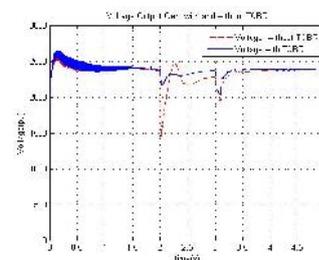
4.3. Simulasi

4.3.1. Kasus 1: Gangguan 1 fasa ke tanah

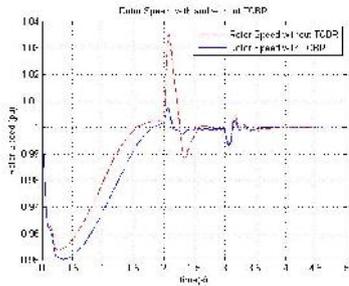
Dari hasil simulasi gangguan satu fasa ke tanah didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 5, 6, 7 dan 8.



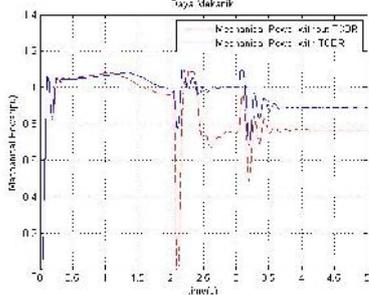
Gambar 5. Grafik Penyulutan Sudut *Thyristor* ketika gangguan *Short circuit* 1 Fasa ke tanah



Gambar 6. Grafik tegangan output generator ketika gangguan *short circuit* 1 fasa ke tanah



Gambar 7. Kecepatan rotor pada generator gangguan *short circuit* 1 fasa ke tanah

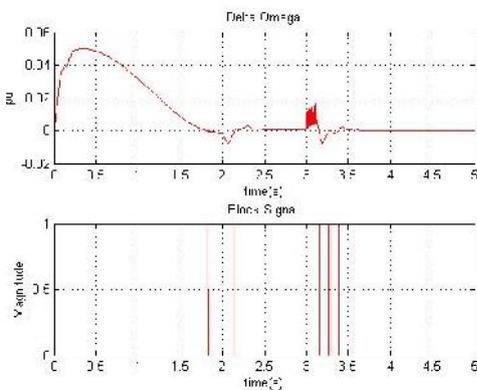


Gambar 8. P_{mech} generator ketika gangguan *short circuit* 1 fasa

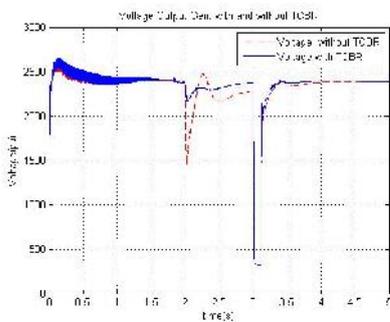
Dari gambar diatas bisa dilihat bahwa dengan adanya pemasangan *TCBR* di generator akan memperbaiki karakteristik dinamika dan stabilitas sistem tenaga.

4.3.2. Kasus 2: Gangguan 2 fasa ke tanah

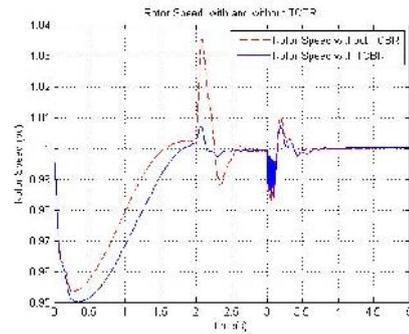
Dari hasil simulasi gangguan dua fasa ke tanah didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 9, 10, 11 dan 12.



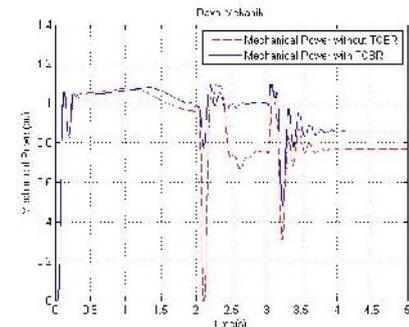
Gambar 9 Grafik penyulutan sudut *thyristor* gangguan *short circuit* 2 fasa ke tanah



Gambar 10. Grafik tegangan output generator ketika gangguan *short circuit* 2 fasa ke tanah



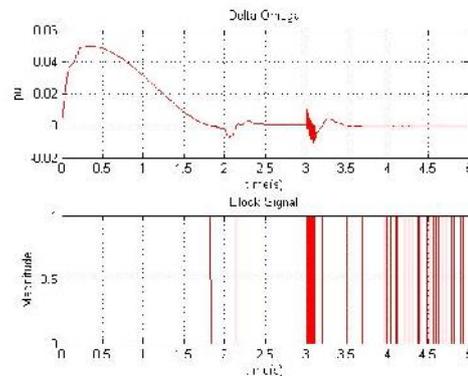
Gambar 11 kecepatan rotor pada Generator ketika Gangguan *Short circuit* 2 Fasa ke tanah



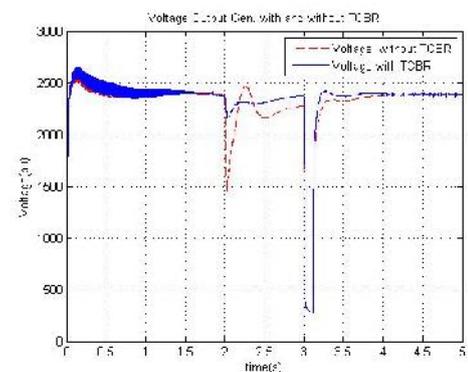
Gambar 12. P_{mech} Generator ketika gangguan *Short circuit* 2 Phase ke tanah

4.3.3. Kasus 3: Gangguan 3 fasa ke tanah

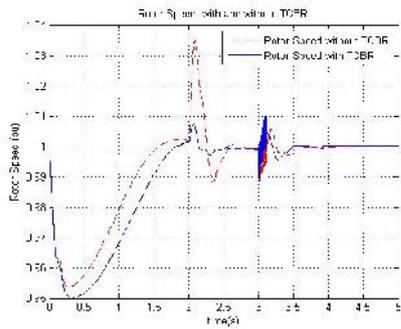
Dari hasil simulasi gangguan tiga fasa ke tanah didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 13, 14, 15 dan 16



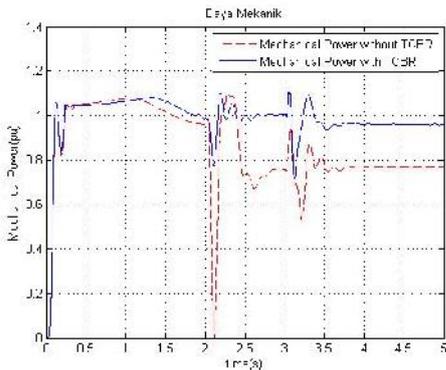
Gambar 13 Grafik Penyulutan Sudut *Thyristor* ketika gangguan *Short circuit* 3 Fasa ke tanah



Gambar 14. Grafik Tegangan output generator ketika gangguan *Short circuit* 3 Fasa ke tanah



Gambar 15 kecepatan rotor pada generator ketika gangguan short circuit 3 fasa ke tanah



Gambar 16. P_{mech} generator ketika gangguan short circuit 3 fasa

Dari hasil simulasi yang telah didapat, dapat dijelaskan bahwa pada saat detik yang 0, sistem di suplai oleh source selama 2 detik, ketika detik ke-2 daya generator masuk ke grid untuk memperbaiki daya dan tegangan yang drop. Hal ini dilakukan untuk melihat perbedaan efek yang timbul ketika sistem di suplai oleh 2 sumber dan 1 sumber.

Dari simulasi yang didapat terlihat bahwa ketika beban masuk ke generator, maka akan terjadi perubahan kinerja pada generator. Generator akan mengalami drop tegangan sesaat dan akan beresilasi. Namun dengan adanya TCBR maka osilasi menjadi berkurang karena efek dari adanya resistor dan reactor yang dipasang di dekat thyristor. Pada detik ke 3 sistem di beri gangguan hubung singkat (1 fasa, 2 fasa dan 3 fasa ke tanah), gangguan ini diberikan selama 0.1 detik. Ketika gangguan tersebut generator masih bisa mempertahankan kestabilan, hal ini ditunjukkan dengan kembalinya kecepatan pada rotor generator ke nilai 1 pu. Jika gangguan yang diberikan lebih dari 0.135 s maka generator tidak dapat kembali ke keadaan kestabilannya.

Pada gambar 8 menjelaskan tentang grafik daya mekanik yang dihasilkan dari sistem yang terpasang TCBR dan tanpa TCBR. Pada detik ke 2 daya mekanik turun dikarenakan daya elektrik naik, sehingga grafik daya mekanik yang dihasilkan turun sampai mendekati 0 pu, namun dengan adanya TCBR hal itu bisa dikurangi, sehingga Daya mekanik tidak terlalu jauh dari 1 pu.

Pada gambar 15 menjelaskan kecepatan rotor pada generator. Ketika detik ke-2, generator dikoneksikan ke grid sehingga terjadi ketidakseimbangan antara daya mekanik dan daya elektrik. Ketidakseimbangan ini menyebabkan generator beresilasi. Jika daya elektrik turun maka kecepatan akan naik

sehingga daya mekanik akan turun hal ini dikarenakan daya yang ada di source lebih besar di dibandingkan dengan daya di generator sehingga beban yang ditanggung oleh generator menjadi berkurang sehingga kecepatan pada rotor menjadi naik.

V. KESIMPULAN

1. Koordinasi Thyristor Control Braking Resistor dapat memperbaiki stabilitas peralihan sistem tenaga listrik dengan cara mengurangi percepatan dan perlambatan rotor. Sehingga osilasi yang dialami oleh generator lebih cepat teredam.
2. Dengan adanya penambahan TCBR maka respon transien sistem akan menjadi lebih baik. Hal ini ditunjukkan dengan adanya penurunan overshoot dan settling time. Dengan demikian sistem akan menuju kondisi stabil dengan lebih cepat setelah terjadi gangguan.
3. pada gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah sistem cenderung tetap stabil dari pada gangguan 3 fasa ke tanah, walaupun terkena gangguan yang cukup lama. Hal ini terjadi karena pada gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah sebenarnya aliran daya listrik tetap ada karena hanya satu atau dua fasa saja yang mengalami gangguan sedangkan untuk fasa yang tidak terkena gangguan masih dapat mengalirkan daya listrik walaupun besarnya menjadi tidak sesuai dengan kondisi waktu sebelum adanya gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Masrul Rudi., Analisis Penggunaan Power System Stabilizer (PSS) dalam Perbaikan Stabilitas Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multisistem, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara (2009).

[2] Firman.Diar., Penggunaan Pengendali logika Fuzzy untuk koordinasi pensaklaran Braking Resistor, Reaktor dan Kapasitor pada perbaikan stabilitas peralihan system tenaga listrik, Tugas Akhir jurusan Teknik Elektro, Universitas Indonesia (2008).

[3] Abied, A.H., Power Systems Analysis & Planning, Hermisphere Publishing Corp. Washington (1983),

[4] IEEE Power Engineering Society, " IEEE 34 node test feeder", < URL : <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/feeder34.zip> >, September, (2011).