

LAPORAN HASIL PENELITIAN



PENGARUH INTEGRASI PLTB TERHADAP SUB-SYNCHRONOUS RESONANCE PADA SISTEM INTERKONEKSI TENAGA LISTRIK

Oleh :

Awan Uji Krismanto, ST., MT., PhD
(NIP. 198003012005011002)

PERPUSTAKAAN	
PROGRAM PASCASARJANA	
ITN MALANG	
CALL. No. 621.3 KRI 8 2020	No. REG. : 053/KD/2022
	TANGGAL : 9.2.2022
	JUMLAH ; 1
	COPY : 1

LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

2020



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
PERPUSTAKAAN PUSAT

Jln. Bendungan Sigura-gura No.2 Malang 65145
 Telp. (0341) 551431 Pes. 163-146-147 Fax. (0341) 553015 Website : library.itn.ac.id/lib

TANDA TERIMA

Telah terima Karya Tulis Dosen yang berupa (Laporan penelitian, Diktat, Pengabdian masyarakat) sebanyak:.....Eksemplar dancopy file, atas:

Nama : Awan Uji Krismanto, ST MT PhD
 NIP : 198003012005011002
 Fakultas / Jurusan : Teknologi Industri / T. Elektro
 Judul/ Jml artikel : Pengaruh Integrasi PLTB Terhadap Sub - Synchronous Resonance pada Sistem Interkoneksi Tenaga Listrik

PERPUSTAKAAN ISNTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG	
CALL No	No. Reg : <u>053/KP/2022</u>
<u>621.3</u>	Taggal : <u>4-2-2022</u>
<u>KRI</u>	Jumlah : <u>1</u>
<u>P</u>	Copies : <u>1</u>
<u>2020</u>	

Catatan: Diisi oleh petugas

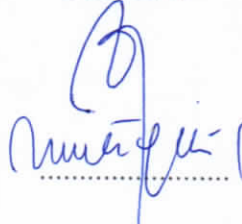
Malang, 4-2-2022

Mengetahui
Ka. Perpustakaan

Yang Menyerahkan

Penerima


Awan Uji Krismanto






**HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN HASIL PENELITIAN**

Judul : Pengaruh Integrasi PLTB terhadap Sub Synchronous Resonance Sistem Interkoneksi Tenaga Listrik

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap & Gelar : Awan Uji Krismanto, ST., MT., PhD
NIDN / NIP : 0001038001/ 198003012005011002
Fakultas / Program Studi : Teknologi Industri/ Teknik Elektro S1
Alamat Surel (E-mail) : awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id
No. HP : 081217200708
Jabatan Fungsional : Lektor

Anggota (1)

Nama Lengkap & Gelar : Dr. Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIDN / NIP : 0703056802/ 1030100350

Fakultas / Program Studi : Teknologi Industri/ Teknik Elektro S1

Anggota (2)

Nama Lengkap & Gelar : Irrine Budi Sulistiawati, ST, MT
NIDN / NIP : 0015067701/ 197706152005012002
Fakultas / Program Studi : Teknologi Industri/ Teknik Elektro S1
Institusi Mitra (jika ada) :
Nama Institusi Mitra :
Alamat Institusi Mitra :
Penanggung Jawab :
Tahun Pelaksanaan : 2020
Biaya Keseluruhan : Rp.12.500.000,00



Dr. Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIP. Y. 1030100350

Malang, 15 Februari 2021

Ketua Peneliti

Awan Uji Krismanto, ST., MT., PhD
NIP. 198003012005011002

RINGKASAN

Pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) sebagai salah satu alternatif sumber energi pembangkit tenaga listrik meningkat secara signifikan. Peningkatan ini didorong oleh kemajuan teknologi peralatan konversi energi serta manfaat yang dihasilkan seperti ketersediaan energi yang melimpah dan ramah lingkungan. Di lain pihak, integrasi pembangkit EBT (PEBT) dapat meningkatkan resiko ketidakstabilan yang disebabkan oleh adanya fluktuasi injeksi daya serta interaksi antara PEBT dan pembangkit konvensional. Interaksi/ resonansi antara bagian poros (*shaft*) dari pembangkit konvensional dengan peralatan kompensasi seri dari saluran transmisi atau sistem kontrol dari PEBT dapat menyebabkan kerusakan parah pada *shaft* generator sehingga menyebabkan pemadaman menyeluruh (*back-out*). Fenomena resonansi ini yang dikenal dengan *sub synchronous resonance* (SSR).

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh integrasi pembangkit listrik berbasis EBT terhadap kondisi stabilitas dan SSR sistem tenaga listrik. Dilakukan investigasi kondisi kestabilan serta perbaikan tanggapan dinamik sistem ketika dioperasikan dengan injeksi daya PEBT yang tidak menentu (*uncertain condition*). Metode baru akan dikembangkan untuk mengidentifikasi terjadinya interaksi dan resonansi serta algoritma sistem kendali untuk menghindari terjadinya interaksi antara PEBT dan pembangkit konvensional. Hasil riset ini dapat dimanfaatkan sebagai salah satu pertimbangan dalam pengambilan keputusan untuk menentukan batas integrasi maksimal PEBT pada sistem interkoneksi sehingga operasi stabil sistem tenaga listrik tersebut dapat dipertahankan. Terlebih, algoritma sistem kendali yang ditawarkan dapat lebih lanjut digunakan untuk mengembangkan sistem tenaga listrik dengan 100% PEBT terutama pada pulau-pulau terpencil dan daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN di seluruh Indonesia.

Kata kunci: Energi Baru Terbarukan, Kestabilan, Interaksi, *Sub Synchronous Resonance*.

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan laju pertumbuhan penduduk dan pemerataan pembangunan. Untuk memenuhi kebutuhan masyarakat akan energi listrik, pemerintah telah mencanangkan program 35.000 MW. Akan tetapi, sampai saat ini, pelaksanaan program penyediaan energi listrik tersebut belum dapat memenuhi kebutuhan energi masyarakat secara merata. Kendala utama dalam program elektrifikasi tersebut antara lain adalah besarnya biaya pembangunan pembangkit dan infrastruktur pendukungnya serta kondisi geografis yang berupa negara kepulauan.

Hal lain yang menjadi perhatian utama pemerintah dalam mewujudkan kemandirian dan ketahanan energi nasional adalah ketersediaan/ cadangan bahan bakar fosil yang semakin menurun. Sehingga, pemanfaatan EBT sebagai salah satu sumber energi menjadi hal yang tidak dapat dihindarkan. Melalui Peraturan Pemerintah No. 79/2014 tentang Kebijakan Energi Nasional serta Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 tahun 2006 tentang Perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Energi Terbarukan (PEBT) Skala Menengah, pemerintah merencanakan pengembangan EBT meliputi pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi, pembangkit tenaga air, pembangkit tenaga angin (PLTB) serta PEBT skala kecil tersebar berupa pembangkit tenaga surya (PLTS), biomassa, biofuel, biogas dan gasifikasi batubara (energi baru). Dengan kebijakan tersebut diharapkan pada tahun 2025 komposisi PEBT paling sedikit 23% dan tahun 2050, diharapkan kontribusi PEBT paling sedikit 31%.

Integrasi PEBT memberikan keuntungan seperti ketersediaan sumber energi yang melimpah dan ramah lingkungan. Di lain pihak, penetrasi PEBT yang semakin meningkat sangat mempengaruhi stabilitas dinamik sistem tenaga listrik [1]. Kondisi EBT yang berfluktuatif serta karakteristik PEBT yang berbeda dengan pembangkit listrik konvensional dalam hal teknologi penggerak dan peralatan konversi energi, berpotensi menimbulkan permasalahan kestabilan [2]-[3]. Salah satu aspek kestabilan yang harus

diperhatikan dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik dengan porsi penetrasi PEBT yang besar adalah mempertahankan kestabilan *small signal* [4]. Permasalahan kestabilan *small signal* muncul akibat injeksi daya PEBT yang berfluktuatif. Hal ini meningkatkan resiko terjadinya ketidakstabilan ketika sistem dihadapkan pada gangguan kecil atau perubahan titik operasi [5]–[7]. Fenomena interaksi dan resonansi antara PEBT dan pembangkit listrik konvensional juga mempengaruhi kondisi kestabilan sistem. Resonansi antara bagian poros (*shaft*) dari pembangkit konvensional dengan sistem kontrol dari PEBT dapat menyebabkan kerusakan parah pada *shaft* generator sehingga menyebabkan pemadaman menyeluruh (*back-out*). Fenomena resonansi ini yang dikenal dengan *sub synchronous resonance* (SSR).

Tujuan yang ingin dicapai dari hasil riset ini adalah memberikan investigasi dan analisis secara komprehensif tentang pengaruh integrasi PEBT skala besar terhadap kestabilan sistem interkoneksi tenaga listrik. Penelitian ini menganalisis pengaruh PEBT terhadap kondisi stabilitas *small signal* dan SSR sistem tenaga listrik. Analisis dan evaluasi terkait kondisi kestabilan, tanggapan dinamik dan SSR dengan kondisi EBT yang tidak menentu akan dilakukan secara komprehensif. Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan metode baru untuk mengidentifikasi terjadinya resonansi dan meningkatkan kondisi kestabilan sistem. Pendekatan probabilitas dan stokastik serta penggunaan data real dari PLN serta badan meteorologi dan geofisika (BMG) akan memberikan hasil analisis yang sesuai dengan kondisi di lapangan. Dengan demikian, hasil yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan bagi suatu daerah untuk menentukan kapasitas pengembangan PEBT. Keutamaan (*urgensi*) dari riset ini adalah meningkatkan penggunaan PEBT dalam skala besar untuk pemerataan energi listrik nasional

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Memodelkan generator dengan *multi-mass* model untuk menganalisa terjadinya SSR pada sistem interkoneksi tenaga listrik.
2. Menganalisa pengaruh integrasi PLTB terhadap SSR.
3. Menganalisis pengaruh ketidakpastian dan kondisi acak dari PLTB terhadap stabilitas dinamik sistem dengan adanya SSR.

4. Menentukan batas-batas kestabilan dan resiko ketidakstabilan sistem akibat terjadinya SSR Ketika EBT dioperasikan secara mandiri pada kondisi yang berfluktuatif.

1.3 Target dan Luaran

Target dan luaran penelitian ini dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Model detail dari generator untuk analisa SSR.
2. Analisa komprehensif terhadap stabilitas sistem terutama dengan adanya SSR.
3. Analisa dampak peningkatan penetrasi PLTB terhadap SSR.
4. Pengembangan metode kontrol untuk meminimalkan pengaruh SSR pada sistem interkoneksi tenaga listrik.

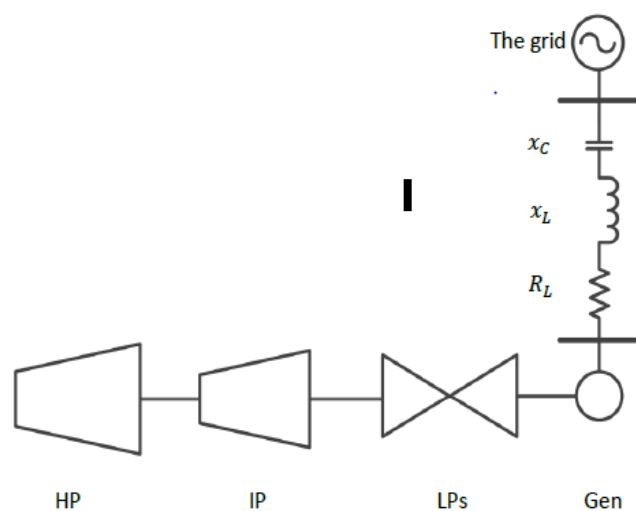
BAB 2

Tinjauan Pustaka

2.1 Sub-Synchronous Resonance

Sejak kemunculan pertama fenomena ini di pabrik Mohave di AS yang menghasilkan dua kegagalan poros berturut-turut pada tahun 1970 dan 1971, telah dianalisis, dan banyak tindakan pencegahan telah disarankan. *Subsynchronous resonance* (SSR) adalah fenomena dinamis dalam sistem tenaga yang memiliki karakteristik tertentu dan ada banyak definisi untuk fenomena listrik ini. Definisi formal dari *subsynchronous resonance* SSR yang di sebutkan IEEE sebagai berikut:

- *Subsynchronous Resonance* (SSR) merupakan fenomena osilasi pada sistem tenaga listrik yang di sebabkan adanya interaksi antara komponen mekanik turbin generator dan kompensator seri.
- Osilasi subsinkron adalah kondisi sistem tenaga listrik di mana jaringan listrik bertukar energi signifikan dengan generator turbin pada satu atau lebih frekuensi alami dari sistem gabungan di bawah frekuensi sinkron sistem setelah gangguan dari keseimbangan.

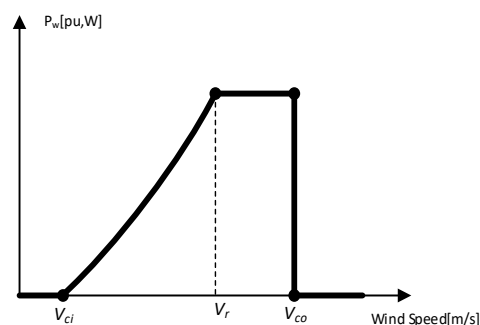


Gambar 2.1 Empat tahap generator turbin uap terhubung ke jaringan melalui transmisi kompensasi seri.

Definisi fenomena SSR dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan generator turbin besar yang terhubung ke bus tak terbatas melalui saluran transmisi kompensasi kapasitor seri. Gambar 2.1 menunjukkan generator yang digerakkan oleh turbin uap multi-tahap yang terdiri dari empat tahap (HP, IP, dan LP) di mana semua tahapan turbin uap selain generator dipasang di poros yang sama. Tahap turbin uap, bagian poros yang menghubungkan massa dan rotor generator sinkron mewakili sistem pegas massa. Untuk sistem pegas massa, terdapat mode osilasi torsional. Setiap frekuensi torsi alami adalah fungsi inersia dari massa yang sesuai dan kekakuan poros yang terhubung.

2.2 Model PLTB berbasis *Fully Rated Converter (FRC)*

Daya yang dibangkitkan oleh PLTB dipengaruhi oleh karakteristik mekanik dari turbin angin, kurva daya keluaran dan kecepatan angin. Kurva karakteristik turbine angin ditunjukkan pada gambar 2.2. Turbin angin beroperasi diantara kecepatan *cut-in* (V_{ci}) dan kecepatan *cut-off* (V_{co}). Diantara kecepatan tersebut, daya yang dibangkitkan akan meningkat secara proporsional sesuai dengan peningkatan kecepatan angin sampai pada kecepatan nominal (V_r). Di luar batas kecepatan tersebut, turbin angin tidak dapat dioperasikan karena alasan efisiensi dan keamanan [8].



Gambar 2.2. Kurva Karakteristik Turbine Angin.

Dengan menggunakan kurva daya dari suatu turbin angin, daya yang dibangkitkan oleh sebuah PLTB dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini [9], [10].

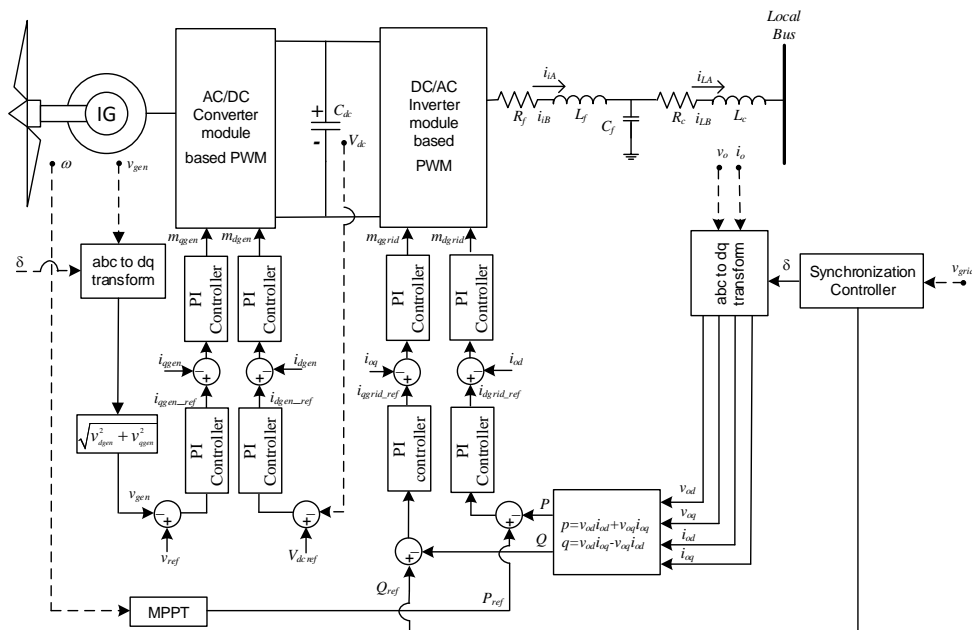
$$P_w(v_w) = \begin{cases} 0 & \text{for } v < v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ \frac{v_w - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} P_{wr} & \text{for } v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{wr} & \text{for } v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

P_w and P_{wr} masing-masing merepresentasikan daya yang dibangkitkan pada kondisi kecepatan angin tertentu dan daya nominal pada PLTB. Pada penelitian ini, injeksi daya dari PLTB dinaikkan secara bertahap untuk menyelidiki pengaruh peningkatan penetrasi PLTB terhadap kestabilan tegangan sistem tenaga listrik.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, kondisi kecepatan angin yang berfluktuasi akan menyebabkan injeksi daya PLTB yang berfluktuasi. Hal ini menuntut adanya kemampuan PLTB untuk dapat beroperasi pada kecepatan angin yang berfluktuatif untuk menjamin kestabilan operasi dan tegangan pada sistem tenaga listrik. Untuk menyelidiki pengaruh peningkatan penetrasi dan injeksi daya dari PLTB, pada penelitian ini, teknologi *Fully Rated Converter System* (FRC) pada PLTB akan dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak DigSILENT Power Factory. Penggunaan teknologi FRC pada PLTB meningkatkan kemampuan PLTB dalam mengoptimalkan pembangkitan daya dari dan menjaga kestabilan sistem ketika terjadi perubahan kecepatan angin secara tiba-tiba. Model dinamik FRC yang disimulasikan terdiri atas model arus dari generator induksi dan model detail dari AC/DC/AC inverter system sebagaimana disajikan dalam [11], [12]. Untuk menyederhanakan analisa, pada penelitian ini, diasumsikan bahwa *pitch angle* dari turbin angin adalah konstan. Blok diagram pemodelan FRC pada PLTB ditunjukkan pada gambar 2.3.

Sistem kendali pada PLTB berbasis FRC terdiri atas dua bagian utama yaitu kendali pada sisi generator dan sisi grid. Kendali pada sisi generator sangat penting untuk mendukung operasi PLTB pada kondisi angin yang bervariasi. Sinyal kendali pada sisi generator didapatkan dengan membandingkan nilai referensi tegangan dari generator dan DC-link untuk menjaga operasi stabil dari PLTB. Kendali pada sisi grid sangat dibutuhkan untuk mengatur aliran daya dan menjaga kestabilan daya keluaran PLTB. Untuk menjamin kestabilan operasi PLTB, sinkronisasi antar pembangkit konvensional dan PLTB harus dapat dipertahankan pada segala kondisi kecepatan angin. Operasi

sinkron PLTB dapat dipertahankan dengan menggunakan kendali *Phase Lock Loop* (PLL). Proses sinkronisasi pada PLTB dengan menggunakan PLL dimulai dengan menentukan nilai referensi untuk sudut daya, frekuensi dan tegangan. Nilai-nilai tersebut kemudian digunakan sebagai input kendali PI untuk menentukan sinyal referensi bagi inverter pada sisi grid.



Gambar 2.3. Model Dinamik dari PLTB berbasis FRC.

2.3 Pengaruh PEPT terhadap Kestabilan Small Signal

Kestabilan pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi kestabilan transien, tegangan dan sudut daya generator (kestabilan *small signal*) [13]. Semakin meningkatnya kapasitas PEPT yang diintegrasikan dengan sistem interkoneksi akan mempengaruhi perilaku dinamik sistem tenaga listrik terutama berkaitan dengan fluktuasi injeksi daya dan pola operasi sistem kendali pada PEPT [14]. Sebagian besar PEPT menggunakan peralatan elektronika daya sebagai peralatan konversi sehingga secara signifikan akan mengurangi inersia sistem. Hal ini mengakibatkan turunnya damping atau kemampuan redaman ketika terjadi gangguan atau perubahan titik operasi. Sistem kendali pada pembangkit EBT juga mempengaruhi performa dinamik dari sistem tenaga listrik [15]. Dari beberapa penelitian, ditemukan bahwa integrasi PEPT pada skala besar dapat

mempengaruhi kestabilan *small signal*, arah aliran daya dan interaksi dengan pembangkit konvensional (*SSR*) ketika sistem dihadapkan pada gangguan kecil seperti perubahan injeksi daya pada PEBT, seting sistem kontrol dan perubahan kecil pada beban [16]. Di sisi lain, *stress* pada generator konvensional akan berkurang karena sebagian porsi pembangkitan daya diambil alih oleh PEBT sehingga dapat memperbaiki kestabilan sistem.

Pengaruh integrasi PLTB pada kestabilan *small signal* sistem tenaga listrik telah diteliti oleh berbagai negara [16]–[22]. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa tipe PLTB yang berbeda akan memberikan pengaruh yang bervariasi baik dalam meningkatkan atau menurunkan performa dinamik sistem. Pengaruh PLTB pada kestabilan sangat bergantung pada lokasi penempatan, kapasitas PLTB, kondisi pembebanan, serta konfigurasi sistem transmisi [23]. Injeksi daya dari PLTB yang berfluktuasi mempengaruhi mode-mode kritis yang berhubungan dengan kestabilan generator konvensional sehingga berpotensi menyebabkan ketidakstabilan operasi [20].

Sama seperti pada PLTB, integrasi pembangkit berbasis PLTS pada sistem kelistrikan yang sudah ada dapat menimbulkan dampak negatif atau positif tergantung dari topologi jaringan transmisi, lokasi penempatan PLTS, level penetrasi dan titik operasi [24]–[28]. Penetrasi PLTS skala kecil pada sistem distribusi dapat meningkatkan kondisi kestabilan sistem karena injeksi daya dari PLTS dapat menurunkan kondisi pembebanan pada saluran distribusi [29], [30]. Pengaruh integrasi PLTS skala besar terhadap kestabilan sistem ditunjukkan dalam [31], [32]. Dalam studi analisis tersebut, dilaporkan bahwa peningkatan injeksi daya dari PLTS secara signifikan menurunkan kondisi kestabilan sistem. Pengaruh pemasangan PLTS dalam menggantikan sebagian atau seluruh porsi pembangkitan dari pembangkit konvensional terhadap kondisi kestabilan sistem dijelaskan dalam [25]. Hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa ketika PLTS hanya menggantikan sebagian daya dari generator konvensional, akan diperoleh peningkatan kondisi kestabilan sistem. Sebaliknya, jika PLTS difungsikan untuk menggantikan seluruh daya dari generator konvensional, maka peningkatan atau penurunan kondisi kestabilan dapat terjadi tergantung dari lokasi pemasangan PLTS tersebut.

2.4 Pengaruh PEBT terhadap Kondisi *Sub Synchronous Resonance* (SSR)

Fenomena interaksi/ resonansi dapat memperbesar osilasi dan memperkuat komponen-komponen harmonisa sehingga menimbulkan distorsi dan mengganggu kestabilan operasi sistem. Peristiwa interaksi dapat diklasifikasikan menjadi interaksi torsional/*sub synchronous resonance* (SSR), interaksi sistem kontrol, interaksi elektromekanik dan interaksi harmonisa. Penelitian ini difokuskan pada investigasi interaksi torsional/ SSR karena interaksi ini dapat membawa pengaruh negatif yang dapat menyebabkan kerusakan yang besar dan kegagalan operasi (*black out*) pada jaringan interkoneksi. SSR terjadi ketika mode kritis dari poros generator sinkron pada pembangkit konvensional berosilasi dan berinteraksi dengan peralatan kompensator yang dipasang pada saluran transmisi karena adanya gangguan seperti operasi switching pada peralatan kompensasi. Frekuensi dari SSR berkisar antara 10 Hz-50 Hz atau 60 Hz [33]. Ketika terjadi SSR, torsi yang diterima oleh poros generator meningkat sangat tinggi sehingga dapat merusak dan mematahkan poros generator [34], [35].

Pengaruh SSR pada sistem yang memiliki banyak generator sinkron dan peralatan kompensator seri sangat dipengaruhi kedekatan lokasi dan kedekatan frekuensi antara dua komponen tersebut. SSR antara mode torsional dan peralatan konversi serta sistem kontrol pada sistem transmisi tegangan tinggi DC (HVDC) dapat terjadi karena kesalahan setting kontrol gain pada sistem kontrol HVDC, nilai reaktansi sistem transmisi yang rendah serta kondisi pembebanan pada DC link [36]–[39]. Lebih lanjut, SSR juga dapat terjadi antara mode torsional dan peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) pada kapasitas tertentu dari peralatan FACTS tersebut [40]–[42]. Interaksi sangat mungkin terjadi antara mode torsional dan sistem kontrol baik pada peralatan kompensator maupun pada peralatan yang berbasis elektronika daya. Dengan semakin meningkatnya level penetrasi dari PEBT, maka potensi terjadinya interaksi khususnya SSR akan meningkat karena penggunaan peralatan elektronika daya sebagai alat konversi energi dan sistem kontrol dari PEBT.

Bab III

Metodologi Penelitian

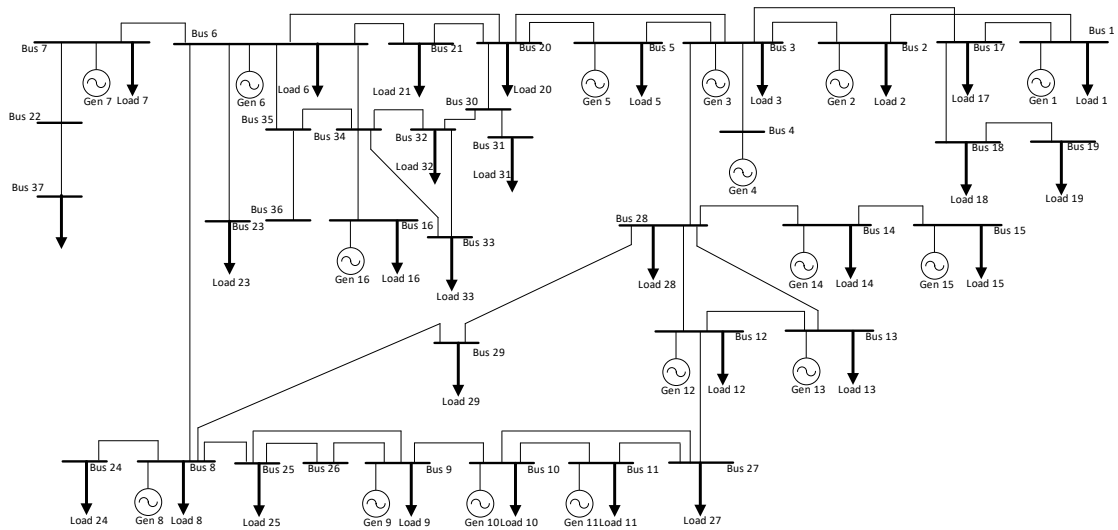
3.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *example Two Area Kundur System*, data jaringan interkoneksi Sulawesi Selatan, data beban tersalurkan, dan single line diagram interkoneksi Sulawesi Selatan. Yang kemudian disimulasikan pada software DigSILENT PowerFactory 15.1. Hasil Simulasi digunakan untuk menganalisis *Subsynchronous Resonance* akibat integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dengan menyelidiki bagaimana nilai eigen dan respon dynamic pembangkit konvensional ketika injeksi daya dari PLTB dinaikkan secara bertahap.

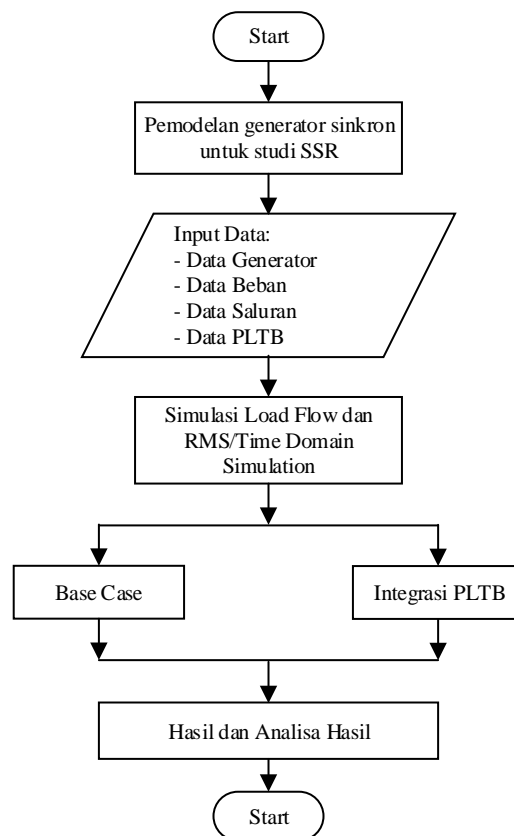
3.2 Studi Kasus

Pengaruh integrasi PLTB terhadap SSR pada sistem interkoneksi tenaga listrik dianalisa pada dua studi kasus. Sistem pertama adalah studi kasus dengan menggunakan tes sistem standar IEEE untuk analisa kestabilan. *Two Area Kundur*. Test sistem ini merepresentasikan sistem kelistrikan yang dihubungkan oleh suatu saluran transmisi panjang sehingga membagi sistem tenaga listrik tersebut menjadi dua daerah yang saling mempengaruhi. Pada *Two Area Kundur System* dilakukan simulasi Base Case dan Integrasi PLTB.

Hasil yang didapatkan dari studi kasus menggunakan IEEE test system dianalisa dan selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk analisa sistem kelistrikan praktis. Sistem kelistrikan praktis yang akan dianalisa pada penelitian ini adalah sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan Barat (Sulselbar) dengan 140 MW injeksi daya dari PLTB Sidrap dan Jeneponto. Sistem kelistrikan Sulselbar terdiri dari 16 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 37 Bus dan 48 saluran yang terhubung dengan pusat beban. Parameter kecepatan shaft atau poros generator yang diselidiki termasuk tingkat injeksi daya dan waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan titik kestabilan yang baru. *One-Line Diagram* sistem kelistrikan Sulsebar ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan Sulselbar.



Gambar 3.2 Diagram Alir penelitian

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.2. Adapun prosedur pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menggambar Single Line dan Input Data Sistem Kelistrikan SulSelBar dan pemodelan detail generator sinkron untuk analisa SSR.

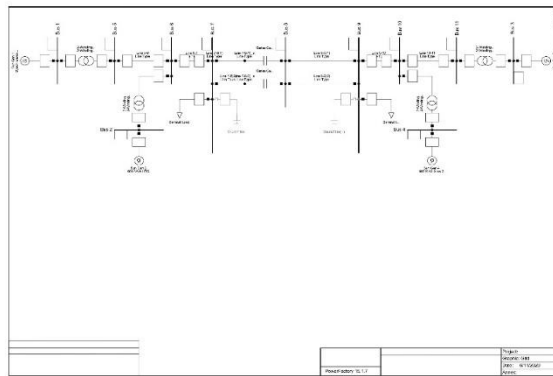
2. Input data kelistrikan dan real time injeksi PLTB pada sistem interkoneksi tenaga listrik.
3. Simulasi Load Flow dan time domain (RMS) pada dua kondisi; pada *base case scenario* dan pada kondisi dengan injeksi daya dari PLTB yang ditingkatkan secara bertahap.
4. Simulasi RMS dilakukan untuk melihat respon kecepatan pada shaft atau poros generator.
5. Dari hasil simulasi Load Flow dan RMS/*Time Domain Simulation* ,kondisi tanpa WECS dan setelah terintegrasi WECS dan dengan adanya kenaikan injeksi daya, dibandingkan untuk melihat perubahan respon kecepatan pada shaft atau poros generator. Jika perbandingan dengan menggunakan RMS pada saat adanya injeksi daya, respon pada grafik kecepatan shaft atau poros generator semakin beresilasi. Selanjutnya dilakukan analisis *Subsynchronous Resonance* pada setiap generator sinkron.

Bab IV

Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Jaringan Two Area Kundur

Tes sistem kelistrikan yang di gunakan pada penelitian yaitu jaringan *Two Area Kundur System* yang terdiri dari 4 unit pembangkit dan beroperasi pada tegangan 230 kV. Sistem tersebut disimulasikan dengan menggunakan software DigSILENT Power Factory seperti ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Single Line Diagram Sistem Two Area Kundur System

Parameter saluran dan data dinamik generator pada sistem *Two Area Kundur* ditunjukkan pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Tabel 4. 1 Data Generator Two Area Kundur System

Unit No.	x_d	x_q	x_d'	x_q'	x_d''	x_q''	x_l
1	2	2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
2	1.8	1.7	0.3	0.55	0.25	0.25	0.2
3	2	2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
4	2	2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1

Tabel 4. 2 Data Transmission Line Two Area Kundur System

No.	Bus	Nominal kV	Line No.	From Bus No.	To Bus No.	R	X	B_{ch} (Full)	Trafo Tap-setting
1.	Bus 01	20.00	1	1	5	0.0529	0.529	0.0000	1
2.	Bus 02	20.00	2	2	6	0.0529	0.529	0.0000	1
3.	Bus 03	20.00	3	3	11	0.0529	0.529	0.0000	1
4.	Bus 04	20.00	4	4	10	0.0529	0.529	0.0000	1
5.	Bus 05	230.00	5	5	6	0.0529	0.529	0.0000	1
6.	Bus 06	230.00	6	6	7	0.0529	0.529	0.0000	1
7.	Bus 07	230.00	7	7	8	0.0529	0.529	0.0000	1
8.	Bus 08	230.00	8	8	9	0.0529	0.529	0.0000	1
9.	Bus 09	230.00	9	9	10	0.0529	0.529	0.0000	1
10.	Bus 10	230.00	10	10	11	0.0529	0.529	0.0000	1
11.	Bus 11	230.00	11	11	3	0.0529	0.529	0.0000	1

4.2 Aliran Daya dan RMS Simulation pada Sistem Two Area Kundur

Simulasi aliran daya (*Load Flow*) bertujuan untuk mengetahui kinerja dan aliran daya (nyata dan reaktif) dalam keadaan tertentu ketika sistem bekerja dalam keadaan normal atau *steady state*. Studi aliran daya juga memberikan informasi tentang tegangan di setiap lokasi, beban saluran transmisi, rugi-rugi saluran serta pembangkitan. Gambar 4.3 menunjukkan profil tegangan pada sistem Two Area Kundur setelah dilakukan analisa Load Flow dengan metode Newton Raphson pada *software DIGSILENT Power Factory 15.1*.

Tabel 4. 3 Tabel Profil Tegangan Bus 230kV

Bus	Nominal kV	Mag. p.u	Mag. kV	Deg
Bus 01	20.00	1.000	20.00	0.00
Bus 02	20.00	1.000	20.00	-14.33
Bus 03	20.00	1.030	20.60	-58.78
Bus 04	20.00	1.010	20.20	-65.62
Bus 05	230.00	0.998	229.46	-1.37
Bus 06	230.00	0.982	225.83	-15.35
Bus 07	230.00	0.922	212.08	-25.37
Bus 08	230.00	0.857	197.00	-43.71
Bus 09	230.00	0.932	214.41	-73.75
Bus 10	230.00	0.996	229.13	-66.62
Bus 11	230.00	1.027	236.29	-59.49

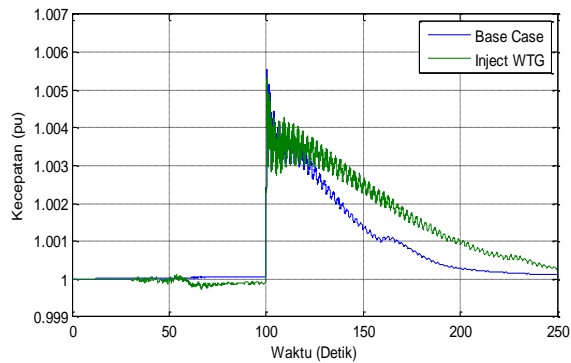
Pada single line Two Area Kundur System terjadi *undervoltage* sebesar 0.857p.u pada pembangkitan 2400MW seperti dalam Tabel 4.3, selanjutnya akan diuji coba integrasi 1 *Wind Energy Conversion System* ke dalam grid pada bus 2 yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dan hasil loadflow ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Profil Tegangan Setelah Diintegrasikan 1 WTG

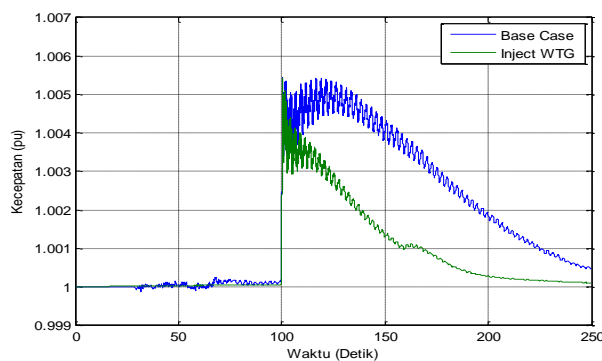
Bus	Nominal kV	Mag. p.u	Mag. kV	deg
Bus 01	20.00	1.000	20.00	-14.89
Bus 02	20.00	1.000	20.00	0,00
Bus 03	20.00	1.030	20.60	-58.52
Bus 04	20.00	1.010	20.20	-65.36
Bus 05	230.00	0.998	229.50	-1.37
Bus 06	230.00	0.984	226.22	-15.32
Bus 07	230.00	0.924	212.52	-25.30
Bus 08	230.00	0.858	197.44	-43.55
Bus 09	230.00	0.933	214.50	-73.49
Bus 10	230.00	0.996	229.14	-66.35
Bus 11	230.00	1.027	236.29	-58.52

Pada perbandingan tabel 4.3 dan tabel 4.4 membuktikan bahwa dengan penambahan 450MW pada interkoneksi Two Area Kundur System, WECS dapat memperbaiki profil tegangan sebanyak 0.001p.u (0.22kV). Selanjutnya akan dilakukan analisa respon dengan keadaan *Base Case* (tanpa WTG), dengan 1 DFIG dan adanya kenaikan injeksi daya pada WECS yang terintegrasi dalam grid. Untuk menganalisa respon/ tanggapan sistem, dilakukan simulasi RMS/ *time domain simulation*.

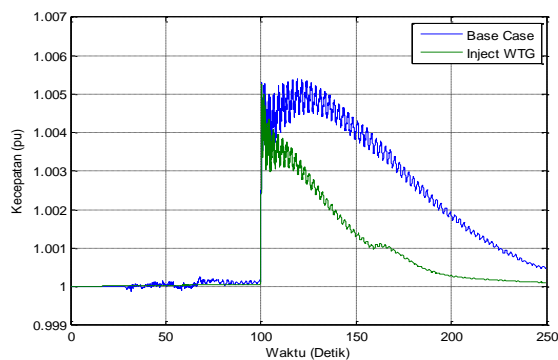
Gambar 4.2 menunjukkan grafik kecepatan pada shaft generator 2 bagian *High Pressure* dimana pada saat adanya integrasi dari WECS membuat grafik kecepatannya menjadi berosilasi, meskipun dapat kembali ke keadaan steady state pada saat di beri gangguan. Gambar 4.3 dan gambar 4.4 menunjukkan grafik kecepatan pada shaft generator 2 bagian *Intermediate Pressure* dan *Low Pressure*, apabila dibandingkan dengan gambar 4.2, pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 kondisi grafik kecepatan osilasi yang terjadi pada bagian *Intermediate Pressure* dan *Low Pressure* tidak sebesar yang terjadi pada bagian *High Pressure*.



Gambar 4. 2 Grafik Kecepatan Base Case pada Shaft Generator 2 High Pressure



Gambar 4. 3 Grafik Kecepatan Base Case pada Shaft Generator Intermediate Pressure

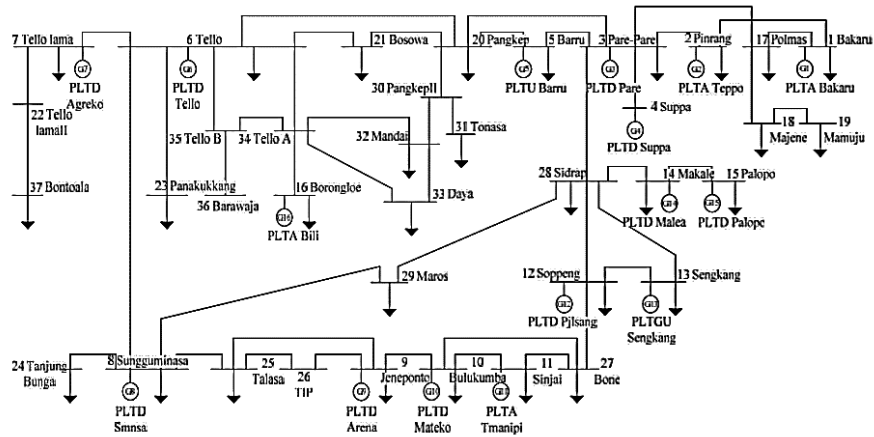


Gambar 4. 4 Grafik Kecepatan Base Case pada Shaft Generator 2 Low Pressure

4.3 Data Jaringan Sulsebar

Analisa pengaruh PLTB pada kondisi SSR sistem diselidiki dengan menggunakan sudi kasus sistem kelistrikan praktis. Studi kasus yang kedua yang dipilih adalah sistem kelistrikan Sulsebar yang terdiri dari

16 unit pembangkit, beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 37 bus dan 48 saluran yang terhubung dengan pusat-pusat beban. Single line diagram sistem kelistrikan Sulselbar ditunjukkan pada Gambar 4.5. Data parameter dinamik generator untuk setiap pembangkit ditunjukkan pada tabel 4.5, dan 4.6, yang meliputi data dinamik generator, data eksitasi.



Gambar 4. 5 Single Line Diagram Sistem Kelistrikan Sulsebar

Tabel 4. 5 Data Dinamik Generator

No	Pembangkit	$X_d(\text{pu})$	$X_d'(\text{pu})$	$X_d''(\text{pu})$	$X_q(\text{pu})$	$X_q'(\text{pu})$	$X_q''(\text{pu})$
1	PLTA Bakaru	0,924	0,28	0,27	0,553	0	0,27
2	PLTA Teppo	0,523	0,385	0,261	0,423	0	0,261
3	PLTD Pare-Pare	0,924	0,28	0,27	0,553	0	0,27
4	PLTD Suppa	0,5	0,385	0,261	0,41	0	0,261
5	PLTU Barru	0,451	0,324	0,204	0,524	0,395	0,204
6	PLTU Tello	0,221	0,1995	0,102	0,211	0,1975	0,102
7	PLTD Agrekko	0,351	0,299	0,204	0,436	0,395	0,204
8	PLTD Sgmnsa	0,468	0,385	0,261	0,375	0	0,261
9	PLTD Arena	0,468	0,385	0,261	0,375	0	0,261
10	PLTD Matekko	0,436	0,385	0,261	0,385	0	0,261
11	PLTA Tmatipi	0,521	0,385	0,27	0,321	0	0,27
12	PLTD Pajelasang	0,425	0,385	0,261	0,385	0	0,261
13	PLTGU Sengkang	0,375	0,2	0,12	0,752	0,6	0,12
14	PLTD Malea	0,42	0,385	0,261	0,435	0	0,261
15	PLTD Palopo	0,523	0,385	0,261	0,271	0	0,261
16	PLTA Bili-Bili	0,435	0,385	0,261	0,375	0	0,261

Tabel 4. 6 Data Eksitasi Generator

No	Nama Pembangkit	$K_A(\text{pu})$	T_A	$V_{A_{\max}}$	$V_{A_{\min}}$
1	PLTA Bakaru	1	0,02	1	-1
2	PLTA Teppo	200	0,05	5	-5
3	PLTD Pare-Pare	1	0,02	1	-1
4	PLTD Suppa	1	0,02	1	-1
5	PLTU Barru	1	0,02	1	-1
6	PLTU Tello	50	0,04	1	-1
7	PLTD Agrekko	100	0,04	1	-1
8	PLTD Sgmnsa	10	0,02	18,3	-18,3
9	PLTD Arena	10	0,02	18,3	-18,3
10	PLTD Matekko	10	0,02	18,3	-18,3
11	PLTA Tmatipi	4	0,02	5,99	-5,99
12	PLTD Pajelasang	10	0,02	18,3	-18,3
13	PLTGY Sengkang	300	0,04	1	-1
14	PLTD Malea	10	0,02	18,3	-18,3
15	PLTD Palopo	4	0,02	5,99	-5,99
16	PLTA Bili-Bili	4	0,02	5,99	-5,99

Data beban dan pembangkitan yang digunakan adalah data operasi harian sistem Sulselbar, di mana yang dipakai adalah data beban puncak yang di tunjukan pada Tabel 4.7, yang meliputi daya aktif dan reaktif pada beban dan pembangkit.

Tabel 4. 7 Data Beban Dan pembangkitan

No Bus	Nama Bus	Jenis Bus	Beban		Pembangkitan	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Bakaru	Slack	4,4	0,2	-	-
2	Pinrang	Generator	15,6	-5,6	0,3	0
3	Pare-Pare	Generator	6	-0,5	20,1	5
4	Suppa	Generator	-	-	62,2	19,7
5	Baru	Generator	6,8	1,7	44,7	0
6	Tello	Generator	39,6	15,3	29,7	18,6
7	Tello Lama	Generator	14	0,4	19,3	0
8	Sgmnsa	Generator	9,4	2,5	12,3	3,8
9	Jnpnto	Generator	10,8	3,1	19,6	-0,9
10	Blkmba	Generator	11	1,6	9	2,2
11	Sinjai	Generator	13	4,4	3,5	-0,6
12	Soppeng	Generator	3,4	9,1	15,1	0,9
13	Sengkang	Generator	18,1	7,2	192,9	-3,7
14	Makale	Generator	9,8	1,8	3,5	0
15	Palopo	Generator	29,9	5,9	6,9	1
16	Borongloe	Generator	7,2	0	7,1	0,9
17	Polmas	Beban	10,2	2,9	-	-
18	Majene	Beban	9,4	2,2	-	-
19	Mamuju	Beban	10,6	2	-	-
20	Pangkep	Beban	15	5,8	-	-
21	Bosowa	Beban	20,2	10	-	-
22	Tel. Lama	Beban	-	-	-	-
23	Panakukkang	Beban	56,4	17	-	-
24	Tanjung Bunga	Beban	31,8	11,3	-	-
25	Talasa	Beban	20,2	5,8	-	-
26	TIP	Beban	-	-	-	-
27	Bone	Beban	21,5	6,1	-	-
28	Sidrap	Beban	18,6	7,1	-	-
29	Maros	Beban	8,9	2,2	-	-
30	Pangkep D	Beban	-	-	-	-
31	Tonasa	Beban	37,8	20,8	-	-
32	Mandai	Beban	22,5	2,1	-	-
33	Daya	Beban	20,8	1,6	-	-
34	TelloA	Beban	-	-	-	-
35	TelloB	Beban	-	-	-	-
36	Barawaja	Beban	-	-	-	-
37	Bontoala	Beban	29,4	0	-	-

Saluran transmisi pada sistem Sulselbar terdiri dari 48 saluran transmisi yang menghubungkan pusat-pusat pembangkit dan beban pada sistem kelistrikan Sulselbar pada Tabel 4.8 yang terdiri dari data Impedansi saluran.

Tabel 4. 8 Data Saluran

Line	Impedansi Per-Line Pu			Impedansi Per-Line ohm			1L/2L
	R	Jx	Y/2	R	Jx	Y2	
1 ke 17	0,0263	0,0944	0,0074	5,9108	21,2400	3,302,E-05	1L
1 ke 2	0,0308	0,1102	0,0101	6,9210	24,8018	4,497,E-05	1L
10 ke 11	0,0313	0,1125	0,0089	7,0448	25,3103	3,935,E-05	1L
10 ke 27	0,0720	0,2585	0,0203	16,1888	58,1648	9,043,E-05	1L
11 ke 27	0,0406	0,1460	0,0115	9,1440	32,8568	5,108,E-05	1L
12 ke 13	0,0211	0,1267	0,0040	4,7385	28,5075	1,794,E-05	2L
12 ke 27	0,0458	0,1631	0,0040	10,3005	36,6885	1,786,E-05	2L
12 ke 28	0,0564	0,2028	0,0048	12,6968	45,6188	2,142,E-05	2L
14 ke 15	0,0392	0,1408	0,0028	8,8133	31,6710	1,231,E-05	2L
14 ke 28	0,0627	0,3775	0,0120	14,1165	84,9443	5,346,E-05	2L
17 ke 18	0,0526	0,1890	0,0037	11,8373	42,5295	1,653,E-05	2L
18 ke 19	0,0734	0,2638	0,0208	16,5195	59,3528	9,228,E-05	1L
2 ke 3	0,0139	0,0497	0,0067	3,1230	11,1915	2,976,E-05	1L
20 ke 21	0,0109	0,0392	0,0049	2,4525	8,8178	2,192,E-05	1L
25 ke 26	0,0103	0,0703	0,0033	2,3063	15,8108	1,473,E-05	2L
28 ke 29	0,0124	0,0846	0,0040	2,7788	19,0395	1,774,E-05	2L
3 ke 17	0,0366	0,1316	0,0182	8,2418	29,6078	8,085,E-05	1L
3 ke 20	0,0946	0,3392	0,0114	21,2940	76,3110	5,073,E-05	2L
3 ke 28	0,0200	0,0720	0,0014	4,5068	16,1955	6,293,E-06	2L
3 ke 4	0,0079	0,0283	0,0006	1,7708	6,3585	2,471,E-06	2L
3 ke 5	0,0231	0,0629	0,0112	5,2065	14,1525	4,960,E-05	1L
5 ke 20	0,0242	0,0867	0,0117	5,4428	19,5008	5,186,E-05	1L
6 ke 20	0,0476	0,1702	0,0057	10,7190	38,2883	2,553,E-05	2L
6 ke 21	0,0168	0,0605	0,0076	3,7868	13,6103	3,383,E-05	1L
6 ke 23	0,0047	0,0170	0,0003	1,0620	3,8160	1,484,E-06	2L
6 ke 7	0,0073	0,0260	0,0009	1,6335	5,8500	3,889,E-06	2L
6 ke 8	0,0039	0,0264	0,0012	0,8663	5,9288	5,524,E-06	2L
8 ke 24	0,0071	0,0426	0,0014	1,5908	9,5760	6,027,E-06	2L
8 ke 25	0,0097	0,0665	0,0031	2,1825	14,9603	1,394,E-05	2L
8 ke 29	0,0543	0,3723	0,0179	12,2243	83,7765	7,938,E-05	2L
9 ke 10	0,0486	0,1747	0,0034	10,9373	39,2985	1,528,E-05	2L
9 ke 25	0,0667	0,2394	0,0047	14,9963	53,8718	2,094,E-05	2L
9 ke 26	0,0362	0,1300	0,0026	8,1383	29,2410	1,136,E-05	2L

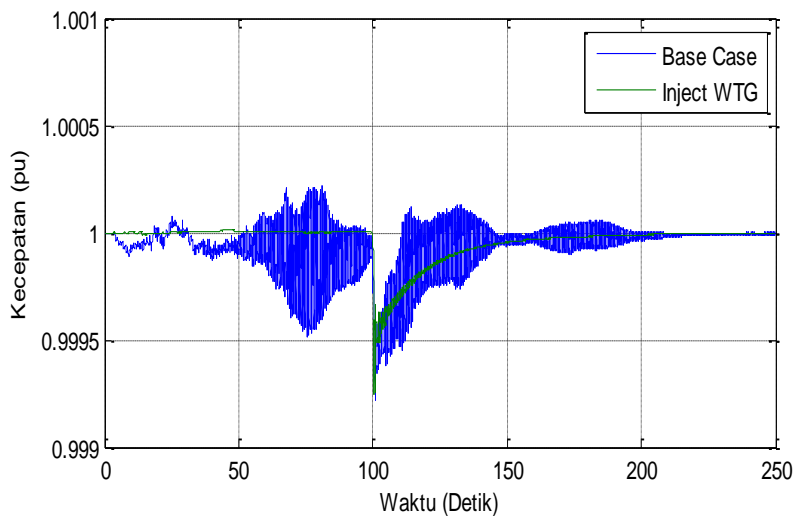
Analisa aliran daya dilakukan pada sistem Sulselbar untuk mengetahui profil tegangan pada kondisi *base case* tanpa PLTB dan pengaruh kenaikan injeksi daya dari PLTB terhadap kondisi profil tegangan sistem. Pada kondisi *base case* terdapat satu bus undervoltage, yakni bus 31 Tonasa ($1.05 \leq n \leq 0.95 p.u$). Profil tegangan sistem Sulselbar sebelum dan sesudah injeksi PLTB ditunjukkan pada Tabel 4.9. Interaksi PLTB ke dalam sistem Sulselbar memberikan dampak positif terhadap perbaikan profil

tegangan sistem. Hal ini terlihat dari kenaikan profil tegangan setiap bus terutama perbaikan tegangan pada bus Tonasa yang semula *under-voltage* menjadi normal. Peningkatan penetrasi PLTB ke dalam sistem Sulselbar memberikan pengaruh yang signifikan terhadap profil tegangan sistem. Integrasi 2 PLTB ke memberikan peningkatan profil tegangan yang lebih baik dibandingkan dengan intgerasi 1 PLTB. Hal ini karena tambahan injeksi daya dari PLTB secara signifikan mengurangi rugi-rugi jaringan sehingga pada akhirnya akan mengakibatkan perbaikan profil tegangan sistem.

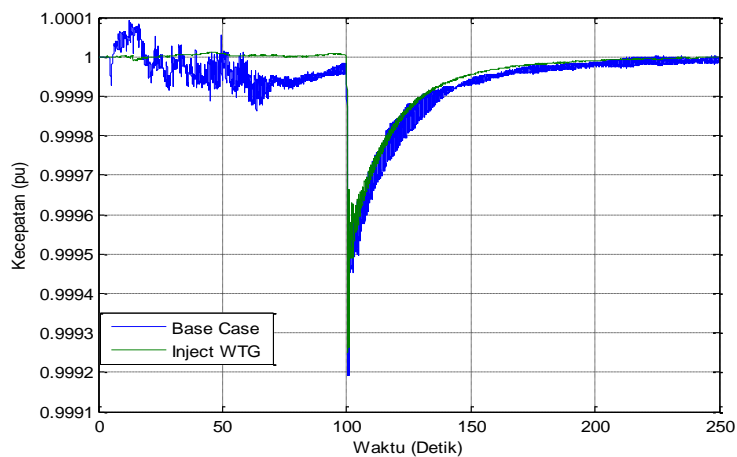
Tabel 4. 9 Tabel Profil Tegangan Bus 150kV

Bus	Profil Tegangan			
	Base Case	1 PLTB Sidrap	1 PLTB Jenepono	2 PLTB
Bus 1 Bakaru	1.003	1.003	1.000	0.998
Bus 2 Pinrang	1.003	1.003	1.003	1.003
Bus 3 Pare-Pare	1.012	1.013	1.012	1.013
Bus 4 Suppa	1.013	1.013	1.013	1.014
Bus 5 Barru	1.020	1.022	1.022	1.022
Bus 6 Tello	1.010	1.010	1.030	1.011
Bus 7 Tello Lama	1.015	1.030	1.030	1.015
Bus 8 Sungguminasa	1.006	1.008	1.008	1.006
Bus 9 Jenepono	1.008	1.008	1.008	1.009
Bus 10 Bulukumba	1.002	1.010	1.006	1.004
Bus 11 Sinjai	0.996	1.011	1.010	0.999
Bus 12 Soppeng	1.005	1.007	1.007	1.006
Bus 13 Sengkang	1.010	1.010	1.009	1.010
Bus 14 Makale	1.003	1.010	1.005	1.004
Bus 15 Palopo	1.001	1.003	1.003	1.001
Bus 16 Borongloe	1.005	1.005	1.005	1.006
Bus 17 Polmas	0.998	0.998	0.997	0.996
Bus 18 Majene	0.989	0.989	0.988	0.987
Bus 19 Mamuju	0.976	0.976	0.975	0.974
Bus 20 Pangkep	0.993	0.999	1.000	0.997
Bus 21 Bosowa	0.995	1.000	1.000	0.999
Bus 22 Tello Lama II	1.007	1.009	1.010	1.009
Bus 23 Panakukkang	1.004	1.007	1.008	1.005
Bus 24 Tanjung Bunga	0.999	1.004	1.004	1.000
Bus 25 Talasa	1.001	1.005	1.004	0.997
Bus 26 TIP	1.002	1.006	1.004	0.997
Bus 27 Bone	0.992	0.999	1.000	0.995
Bus 28 Sidrap	1.000	1.006	1.005	1.005
Bus 29 Maros	0.995	1.003	1.004	1.000
Bus 30 Pangkep II	0.974	0.981	0.982	0.979
Bus 31 Tonasa	0.948	0.955	0.956	0.953
Bus 32 Mandai	0.990	0.991	0.991	0.991
Bus 33 Daya	0.994	0.993	0.995	0.995
Bus 34 Tello A	1.002	1.003	1.003	1.003
Bus 35 Tello B	1.006	1.003	1.007	1.007
Bus 36 Barawaja	1.006	1.006	1.007	1.007
Bus 37 Bontoala	0.998	1.002	1.003	1.000

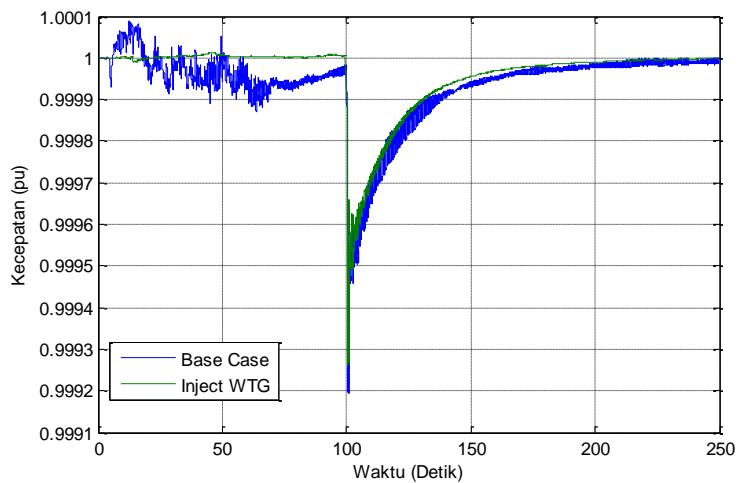
Pengaruh PLTB terhadap SSR pada sistem Sulsebar ditunjukkan pada gambar 4.6. Gambar tersebut menunjukkan grafik base case dan integrasi WECS di Sidrap. Dari gambar tersebut terlihat bahwa injeksi daya yang rendah dari PLTB *low penetration* pada sistem memperbaiki respon dinamik dari sistem yang ditunjukkan oleh respon kecepatan pada shaft tekanan tinggi (*high-pressure shaft*) pada generator. Pengaruh injeksi PLTB pada intermediate dan low pressure shaft generator ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8.



Gambar 4. 6 Grafik Kecepatan Base Case dan integrasi WECS di Sidrap pada Shaft Generator High Pressure

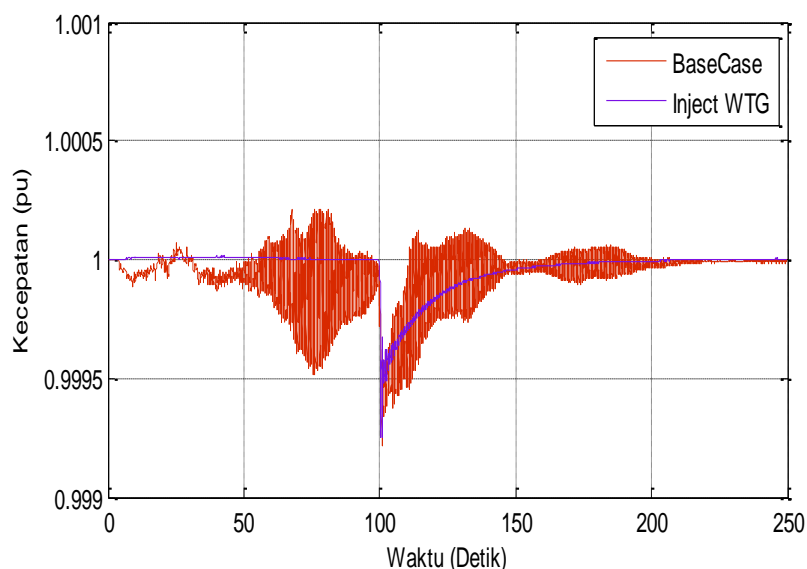


Gambar 4. 7 Grafik Kecepatan Base Case dan integrasi WECS di Sidrap pada Shaft Generator Intermediate Pressure

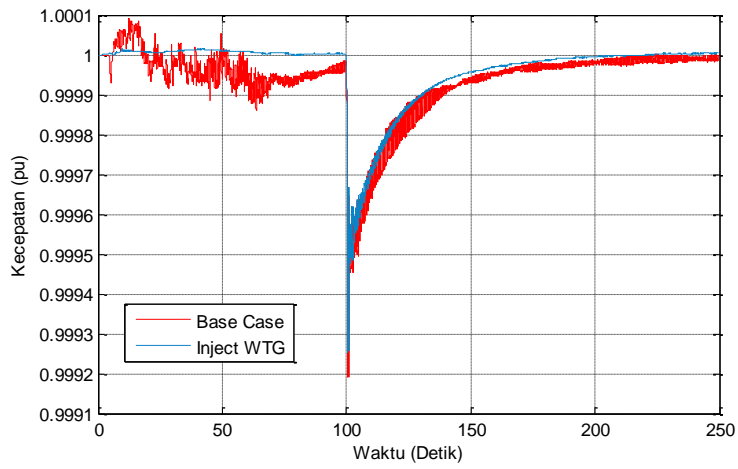


Gambar 4. 7 Grafik Kecepatan Base Case dan integrasi WECS di Sidrap pada Shaft Generator Low Pressure

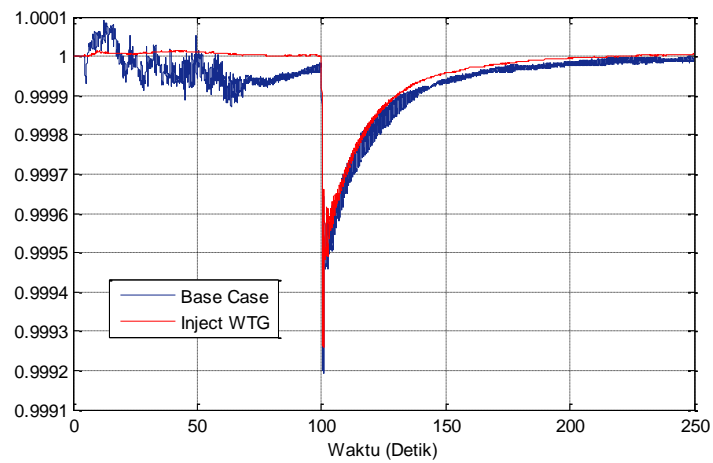
Pengaruh PLTB Jeneponto terhadap SSR pada sistem Sulsebar ditunjukkan pada gambar 4.8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa injeksi daya yang rendah dari PLTB *low penetration* pada sistem memperbaiki respon dinamik dari sistem yang ditunjukkan oleh respon kecepatan pada shaft tekanan tinggi (*high-pressure shaft*) pada generator. Pengaruh injeksi PLTB pada intermediate dan low pressure shaft generator ditunjukkan pada gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4. 8 Grafik Kecepatan Base Case dan Integrasi WECS di Jeneponto pada Shaft Generator High Pressure

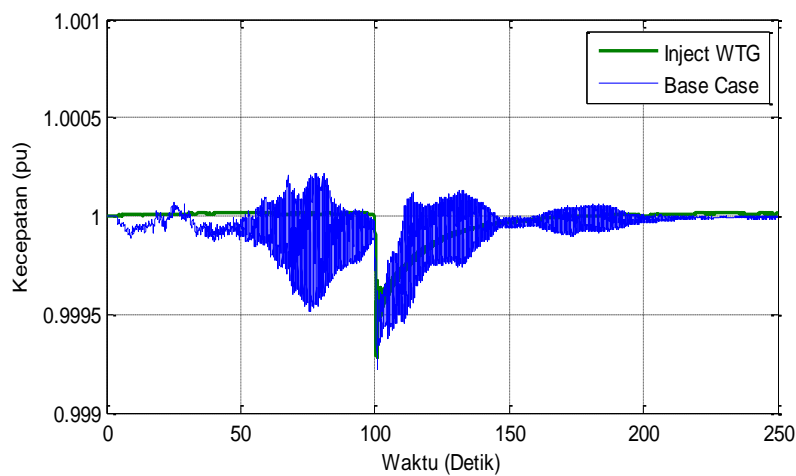


Gambar 4. 9 Grafik Kecepatan Base Case dan Integrasi WECS di Jeneponto pada Shaft Generator Intermediate Pressure

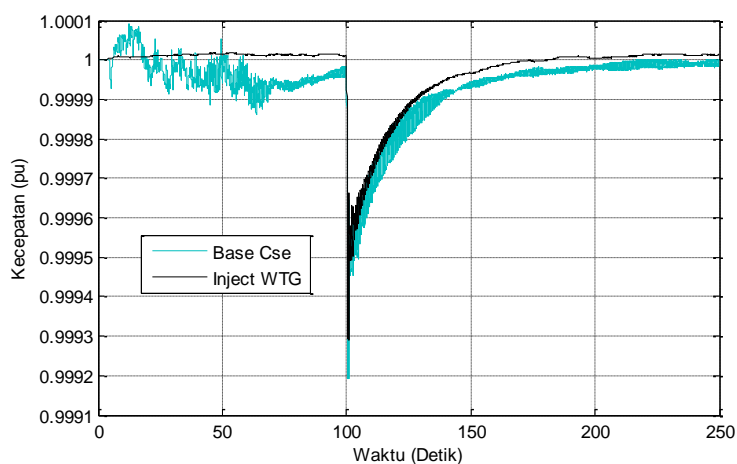


Gambar 4. 10 Grafik Kecepatan Base Case dan Integrasi WECS di Jeneponto pada Shaft Generator Low Pressure

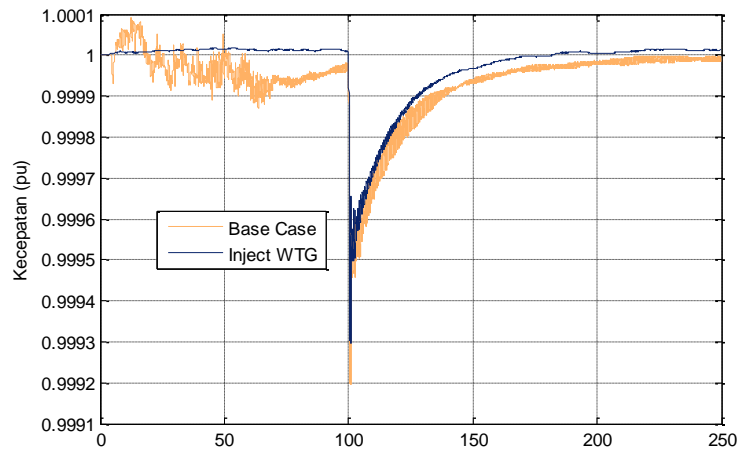
Pengaruh Integrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto terhadap SSR pada sistem Sulsebar ditunjukkan pada gambar 4.11. Dari gambar tersebut terlihat bahwa injeksi daya yang rendah dari PLTB *low penetration* pada sistem memperbaiki respon dinamik dari sistem yang ditunjukkan oleh respon kecepatan pada shaft tekanan tinggi (*high-pressure shaft*) pada generator. Pengaruh injeksi PLTB pada intermediate dan low pressure shaft generator ditunjukkan pada gambar 4.12 dan 4.13.



Gambar 4. 11 Grafik Osilasi Base Case dan Integrasi WECS di Sidrap dan Jeneponto pada Shaft Generator High Pressure



Gambar 4. 12 Grafik Osilasi Base Case dan Integrasi WECS di Sidrap dan Jeneponto pada Shaft Generator Intermediate Pressure



Gambar 4.13 Grafik Osilasi Base Case dan Integrasi WECS di Sidrap dan Jeneponto pada Shaft Generator Low Pressure

BAB 5

KESIMPULAN

Dalam penelitian “Analisis *Subsynchronous Resonance* (SSR) akibat Integrasi Pemangkit Listrik Tenaga Bayu Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan dan Barat (SulSelBar), di dapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Integrasi PLTB pada sistem IEEE Two Area kundur system hasil dari *time domain simulation/RMS* didapatkan hasil dimana pada saat WECS memberikan *low penetration* kondisi sistem tidak terjadi osilasi yang besar bahkan pada saat diberi gangguan sistem mampu kembali ke keadaan steady state, sedangkan pada saat sistem menerima *high penetration* dari WECS yang terjadi adalah kondisi sistem menjadi jatuh dibawah batas kritis dan osilasi terbesar terjadi pada *High Pressure*, osilasi pada shaft cenderung berkurang pada saat tingkat tekanannya menurun
2. Integrasi PLTB pada sistem kelistrikan SulSelBar hasil dari *time domain simulation/RMS* didapatkan hasil pada saat *low penetration* yang diberikan oleh WECS kondisi pada shaft generator cenderung lebih berosilasi daripada speed generator meskipun sistem tetap bisa kembali ke keadaan steady state, sedangkan saat diberi *high penetration* oleh WECS kondisi shaft speed sangatlah berosilasi. Sama seperti Two Area Kundur system, osilasi pada shaft speed yang terbesar terletak pada *High Pressure*, dan osilasi cenderung berkurang pada saat tingkat tekanan pada turbin menurun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SSR Suppression via STATCOM in Series Compensated Wind Farm Integrations. S.Golshannavaz, M.Mokhtari, D.Nazarpour. Electrical Engineering Department,Urmia University, Urmia.Ieeexplore.ieee.org
- [2] *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development/ Vol. 2, Issue 11, 2015.* Subsynchronous Resonance Mitigation in DFIG-Based Wind Farm. Pooja A. Patel¹ Sweta Chauhan². ¹Student ²Assistant Professor. ^{1,2}Department of Electrical Engineering. ^{1,2}PIET, Vadodara, India
- [3] OPTIMAL CONTROL OF SVC FOR SUBSYNCHRONOUS RESONANCE STABILITY IN TYPICAL POWER SYSTEM. S. H. Hosseini and O.Mirshekar. Electrical Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, IRAN. e-mail :hosseini@tabrizu.ac.ir
- [4] International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. Eigenvalue Analysis of Subsynchronous Resonance Study in Series Compensated Wind Farm. Scientific Journal Impact Factor (SJIF): 1.711.
- [5] International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 9, Number 18 (2014). Analysis and Mitigation of Subsynchronous Resonance due to Torsional Interaction. G Muthuselvi¹ and M Shanmugasundaram². ¹ Department of Electrical and Electronics Engineering Ganadipathy Tulsi's Jain Engineering College ((Kaniyambadi, Tamilnadu, India)). ² School of Electronics Engineering VIT University (Vellore,Tamilnadu,India)).(gselvisundar@gmail.com, mshanmugasundaram@vit.ac.in)
- [6] International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, Special Issue 1, February 2014. Damping of Subsynchronous Resonance in an Series Compensated System using PSCAD. Naresh Babu.G¹, Sudhagar.V². Department of EEE, Valliammai Engineering College, SRM Nagar, Kathangulathur- 603203, Kanchipuram District, Tamil Nadu, India^{1,2}

- [7] International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE) June 2012 Issue 11 Volume 4. MITIGATING SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN HYBRID SYSTEM WITH STEAM AND WIND TURBINE BY UPFC. H. Hosseini A. Boudaghi A. Mehri H. Farshbar S.F. Torabi. Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran. uh.hosseini@gmail.com, bargh.basu@gmail.com, alimehri20@gmail.com, hadi.farshbar@gmail.com, s.farid.torabi@gmail.com
- [8] International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology *Vol. 2, Issue 7, July 2013*. STUDY OF SUBSYNCHRONOUS RESONANCE AND ANALYSIS OF SSR. Ranjit M. Zende¹, Suryakant H. Pawar². P.G. Student, Department of Electrical Engineering, Govt. College of Engg.Karad, Maharashtra, India¹. Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Govt. College of Engg.Karad, Maharashtra, India²
- [9] UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL. SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN DFIG-BASED WIND FARMS. MOHSEN GHAFOURI. DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE. ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL. Mohsen Ghafouri, 2018
- [10] The Effect of Wind Turbines on Subsynchronous Resonance. Ahmed Ewais School of Engineering Cardiff University. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy 2014.
- [11] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, “Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1326–1334, 1985.
- [12] IEEE Committee Report, “Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 2, pp. 506-511, Mar.1980.
- [13] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, “Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1326–1334, 1985.
- [14] P. M. Anderson, B. L. Agrawal, and J. E. Van Ness, *Subsynchronous Resonance in power systems*. IEEE Press, 1989.

- [15] K. R. Padiyar, *Analysis Of Subsynchronous Resonance in Power Systems*. Kluwer, 1999
- [16] K.R.Padiyar, *Power System Dynamics Stability and Control*, India: BS Publications, 2011, pp. 336-337
- [17] P.M.Anderson, B.L.Agrawal, J.E.Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power System*, New York: IEEE press, 1990, pp. 10-11.
- [18] Selam Chernet, *Subsynchronous Resonance In Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Farms*, Departement Of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2016
- [19] Belajar Elektronika, “Menghasilkan Listrik dari Energi Angin dengan Generator Induksi Doubly Fed,” *Abdul Elektro*. [Online]. Available: <https://abduelektro.blogspot.com/2019/10/menghasilkan-listrik-dari-energi-angin.html>.
- [20] Boyle, T. Littler, and A. Foley, “Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation,” *J. Eng.*, vol. 2018, no. 15, pp. 1061–1065, 2018.
- [21] R. A. Gupta, B. Singh, and B. B. Jain, “Wind energy conversion system using PMSG,” *2015 Int. Conf. Recent Dev. Control. Autom. Power Eng. RDCAPE 2015*, pp. 199–203, 2015.
- [22] A. K. Pandey, “Variable Wind Speed,” *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Sect. Int. Conf. Electr. Electron. Comput. Eng.*, no. Mv, pp. 1–6, 2018
- [23] D. Carroll, James; McDonald, Alasdair; McMillan, “Offshore cost of energy for DFIG PRC turbines vs. PMG FRC turbines,” *Electron. Electr. Eng. Energy Syst.*, 2015.
- [24] J. Carroll, A. McDonald, and D. McMillan, “Reliability Comparison of Wind Turbines With DFIG and PMG Drive Trains,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 2, pp. 663–670, 2015.
- [25] D. Powerfactory, “Stability Analysis Functions (RMS).” [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/stability-analysis.html>.