

LAPORAN HASIL PENELITIAN



ANALISA STOKASTIK DAN PERBAIKAN STABILITAS
DINAMIK PADA OPERASI *AUTONOMOUS* SISTEM MICROGRID

Oleh :

Awan Uji Krismanto, ST., MT., Ph.D (NIP. 198003012005011002)

Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT (NIP. Y. 1018800189)

PERPUSTAKAAN PROGRAM PASCASARJANA ITN MALANG	
CALL. No. 621-3 KPI 2019	No. REG. : 052/KD/2022
	TANGGAL : 1.2.2022
	JUMLAH : 1
	COPY : 1

LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

2019



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 Krismananto, ST MT PhD
 NIP : 198003012005011002
 Fakultas / Jurusan : Teknologi Industri / T. Elektro
 Judul/ Jml artikel : Analisa Stokastik dan Perbaikan Stabilitas Dinamik pada Operasi Autonomous Sistem Microgrid

PERPUSTAKAAN ISNTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG	
CALL No <u>621.3</u> <u>KRI</u> <u>4</u> <u>2019</u>	No. Reg : <u>052/KP/2022</u> Taggal : <u>4-2-2022</u> Jumlah : <u>1</u> Copies : <u>1</u>

Catatan: Diisi oleh petugas

Malang, 4 2 2022

Mengetahui
Ka. Perpustakaan

Yang Menyerahkan

Awan Uji Krismananto

Penerima

Muhammad Juri


Handwritten signature

HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENELITIAN HIBAH INTERNAL

Judul : Analisa Stokastik dan Peningkatan Stabilitas Dinamik pada Operasi Autonomous Sistem Microgrid

Peneliti/Pelaksana

Nama Lengkap & Gelar : Awan Uji Krismanto, ST, MT, Ph.D
NIDN / NIP : 0001038001 / P. 198003012005011002
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1
Alamat Surel (E-mail) : awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id
No. HP : 081217200708
Jabatan Fungsional : Lektor

Anggota (1)

Nama Lengkap & Gelar : Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT.
NIDN / NIP : 0709065601 / Y. 1018800189
Fakultas / Program Studi : Fakultas Teknologi Industri / Teknik Elektro S-1
Institusi Mitra (jika ada) :
Nama Institusi Mitra :
Alamat Institusi Mitra :
Penanggung Jawab :
Tahun Pelaksanaan : 2019
Biaya Keseluruhan : Rp. 12.500.000,00



Mengetahui,
Wakil Rektor I ITN Malang

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

Malang, 17 Desember 2019
Ketua,

(Awan Uji Krismanto, ST, MT, Ph.D)
NIP. P. 198003012005011002

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN PENGESAHAN	2
DAFTAR ISI	3
RINGKASAN	4
BAB 1 Pendahuluan	5
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Tujuan Penelitian	6
1.3 Target dan Luaran	7
BAB 2 Tinjauan Pustaka	8
2.1 Stabilitas pada Sistem Microgrid	8
2.2 Analisa Stokastik Stabilitas <i>Small-Signal</i> akibat Ketidakpastian EBT...	9
BAB 3 Metodologi Penelitian	11
BAB 4 Anggaran Biaya dan Jadwal Kegiatan	13
4.1 Anggaran Biaya	13
4.2 Jadwal Kegiatan	13
DAFTAR PUSTAKA	14
LAMPIRAN-LAMPIRAN	16

RINGKASAN

Penelitian ini menganalisa pengaruh dari ketidakpastian (*uncertainty*) dari energi baru terbarukan (EBT) terhadap kestabilan *small-signal* dan perbaikan tanggapan dinamik dari sistem microgrid (MG) ketika dioperasikan secara mandiri (*autonomous*). Fungsi probabilitas distribusi EBT diestimasi dengan menggunakan pendekatan metode *Copula*. Analisa probabilitas kestabilan dari sistem MG dilakukan dengan pendekatan probabilistik dan stokastik untuk mendapatkan gambaran yang lengkap berkaitan dengan perilaku dinamik dan resiko ketidakstabilan. Stabilitas *small-signal* dari sistem MG ketika dioperasikan secara mandiri dalam kondisi EBT yang berfluktuatif dievaluasi melalui probabilitas distribusi eigenvalues kritis dengan menggunakan metode *Monte Carlo*.

Kata kunci: energi baru terbarukan, microgrid, probabilistic, Monte Carlo.

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Sebuah gugus atau sekelompok pembangkit terdistribusi/ distributed generator (DG) dapat dioperasikan sebagai suatu sistem yang terkontrol dan terkoordinasi. Sistem tenaga elektrik tersebut dikenal secara luas sebagai microgrid (MG). Sebagai sebuah sistem tenaga elektrik, MG dapat dioperasikan secara terpisah (*autonomous*) dan terintegrasi (*grid-tied*) dengan jaringan yang sudah ada. MG pada umumnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik pada daerah-daerah terpencil yang belum tersentuh jaringan distribusi listrik. Sehingga, MG biasanya dioperasikan secara mandiri.

Terdapat beberapa hal yang menjadi perhatian utama ketika MG harus dioperasikan secara mandiri (*autonomous*) atau terpisah dari jaringan distribusi yang sudah ada. Pertama, MG harus mampu menyediakan energi listrik sesuai dengan kebutuhan beban serta mempertahankan kestabilan tegangan dan frekuensi. Karena hampir semua unit DG menggunakan sumber energi baru terbarukan (EBT), ketersediaan sumber EBT seperti tenaga surya/ photovoltaic (PV) dan angin menjadi pertimbangan utama dalam desain dan perencanaan operasi mandiri sistem MG. Fluktuasi daya yang dibangkitkan oleh setiap DG pada MG sebagai akibat kondisi EBT yang tidak pasti (*uncertain*) secara signifikan mempengaruhi kondisi kestabilan sistem MG. Masalah ketidakstabilan pada MG dapat terjadi karena adanya perubahan titik operasi yang muncul akibat terjadinya gangguan dan kontribusi daya yang berfluktuasi dari setiap DG pada MG [1]–[3].

Untuk menjamin kontinuitas pelayanan dan ketersediaan energi listrik serta menjaga kestabilan sistem, diperlukan studi dan analisis yang menyeluruh terkait dengan resiko ketidakstabilan (*risk assessment*) pada operasi mandiri sistem MG. Analisis tersebut harus mempertimbangkan kondisi aktual EBT serta semua skenario yang mungkin terjadi untuk melihat tanggapan dinamik, performa stabilitas dari sistem dan menentukan batas-batas operasi stabil pada operasi mandiri sistem MG. Mengacu dari studi pustaka yang telah dilakukan, analisa kestabilan pada sistem MG pada umumnya menggunakan metode *deterministic modal analysis*. Pertimbangan dan kekurangan utama dari analisa kestabilan secara deterministik adalah ketidakmampuan metode tersebut

untuk memberikan informasi yang lengkap terkait dengan karakteristik acak dan stokastik dari MG akibat ketidakpastian kondisi EBT [4], [5]. Terlebih, dengan menggunakan studi deterministic, sangat sulit untuk memperoleh gambaran lengkap yang berkaitan dengan batas kestabilan operasi dari sistem MG [6]. Keterbatasan metode deterministik tersebut memotivasi penggunaan metode baru yang berdasarkan pendekatan probabilistik dan stokastik.

Metode *Monte Carlo* telah banyak digunakan untuk menyelidiki karakteristik kestabilan pada sistem tenaga listrik ketika dioperasikan dalam kondisi pembangkitan dan pembebanan yang tidak menentu [5]–[10]. Akan tetapi, penggunaan metode *Monte Carlo* untuk menyelidiki performa dinamik pada operasi mandiri sistem MG masih sangat jarang dilakukan. Pada penelitian ini, metode *Monte Carlo* digunakan untuk menyelidiki kestabilan pada sistem MG dengan mempertimbangkan keterkaitan acak (*stochastic dependency*) antara beberapa sumber EBT. Untuk memperoleh hasil yang akurat, data lapangan dari kecepatan angin dan iradiasi sinar matahari selama satu tahun dengan akurasi sampling setiap satu menit akan digunakan pada penelitian ini. Lebih lanjut, metode *Modal Analysis* akan digunakan untuk menghitung nilai *eigenvalues* dan menentukan kondisi kestabilan dari sistem MG. Untuk menentukan resiko ketidakstabilan operasi, probabilitas dan distribusi damping akan diklasifikasikan dengan menggunakan metode *K-Mean Clustering*. Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas tentang kondisi ketabilan dari sistem MG ketika dioperasikan pada kondisi EBT yang berfluktuasi. Pada akhirnya, hasil yang akan didapatkan dalam penelitian ini dapat dipergunakan sebagai dasar untuk perencanaan dan desain sistem MG berbasis EBT.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Memodelkan kondisi dan distribusi stokastik dari EBT dengan mempertimbangkan keterkaitan antar beberapa sumber energi seperti kecepatan angin dan iradiasi sinar matahari.
2. Menganalisis pengaruh ketidakpastian dan kondisi acak dari EBT terhadap stabilitas dinamik sistem MG ketika dioperasikan secara mandiri.

3. Menentukan batas-batas kestabilan dan resiko ketidakstabilan sistem MG ketika dioperasikan secara mandiri pada kondisi EBT yang berfluktuatif.
4. Mengimplementasikan metode baru untuk memperbaiki tanggapan dinamik dan meningkatkan kestabilan dari sistem MG.

1.3 Target dan Luaran

Target dan luaran penelitian ini dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Model stokastik dari sumber daya energi baru terbarukan berupa model stokastik kecepatan angin dan iradasi sinar matahari.
2. Analisa komprehensif terhadap stabilitas sistem MG ketika dioperasikan secara mandiri.
3. Implementasi metode baru untuk meningkatkan performa dinamik dan batas kestabilan dari sistem MG.
4. Publikasi pada jurnal internasional bereputasi.

BAB 2

Tinjauan Pustaka

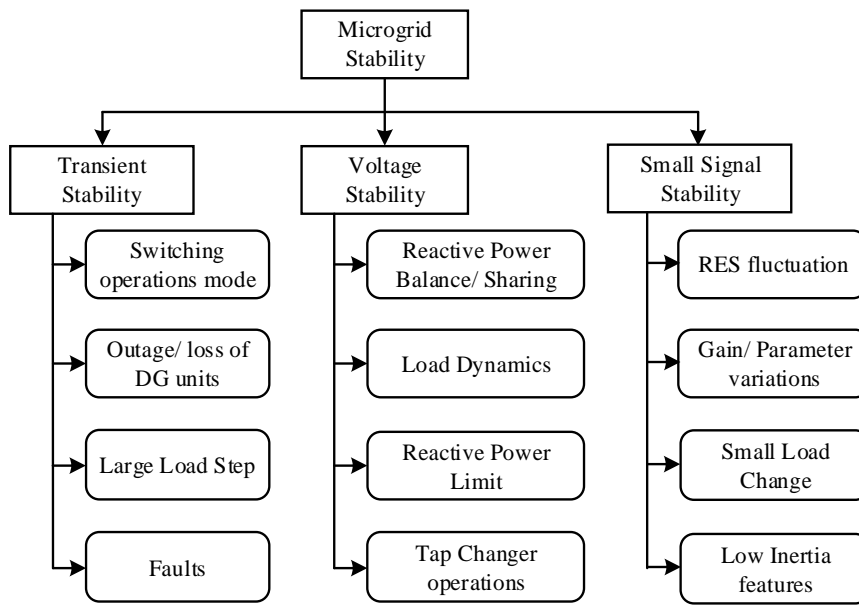
2.1 Stabilitas pada sistem Microgrid (MG)

Operasi sistem tenaga elektrik secara terus-menerus dihadapkan pada kondisi yang tidak pasti (*uncertain*) seperti perubahan profil beban, gangguan hubung singkat dan perubahan penjadwalan pembangkit. Kondisi yang tidak pasti tersebut mengakibatkan perubahan titik operasi yang menimbulkan kondisi osilasi pada sistem tersebut. Jika damping yang tersedia mencukupi, maka osilasi tersebut dapat segera teredam dan tidak menimbulkan permasalahan lebih lanjut. Sebaliknya jika damping ada tidak mencukupi maka osilasi tidak dapat teredam dan pada akhirnya akan mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Pada sistem yang melibatkan EBT seperti pada MG, kondisi yang tidak pasti tersebut bertambah dengan adanya ketidakpastian pada kondisi EBT. Perubahan titik operasi terjadi secara terus-menerus akibat fluktuasi EBT sehingga beresiko menyebabkan kondisi osilasi. Dengan demikian kontinuitas dan ketidakpastian EBT secara signifikan mempengaruhi kestabilan terutama kestabilan *small signal* pada sistem tenaga elektrik.

Stabilitas pada sistem MG dapat diklasifikasikan menjadi kestabilan *transient*, tegangan dan *small-signal* [11]. Stabilitas *transient* berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mempertahankan kestabilan setelah mengalami gangguan besar seperti hubung singkat, perubahan struktur pada MG karena adanya unit DG yang terlepas dari sistem dan peralihan dari mode operasi *grid-tied* ke *autonomous*. Kemampuan untuk mempertahankan variasi tegangan pada nilai yang ditentukan berkaitan dengan stabilitas tegangan. Sedangkan kemampuan untuk mempertahankan kondisi stabil setelah mengalami gangguan atau perubahan kecil berkaitan dengan stabilitas *small-signal*. Klasifikasi kestabilan pada sistem MG ditunjukkan pada gambar 2.1.

Unit pembangkit pada sistem MG pada umumnya menggunakan unit DG berbasis EBT yang menggunakan peralatan elektronika daya sebagai alat konversi energi sehingga nilai inersia pada sistem MG lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit konvensional berbasis mesin-mesin sinkron. Hal ini mengakibatkan sistem MG sangat sensitif terhadap gangguan dan perubahan kecil. Karena sistem MG memiliki damping yang rendah

sebagai akibat kurangnya inersia pada unit pembangkit pada MG, perubahan atau gangguan kecil tersebut apabila tidak dikendalikan secara benar, berpotensi menyebabkan ketidakstabilan [12]–[14].



Gambar 2.1 Klasifikasi Stabilitas pada Microgrid (MG)

Permasalahan stabilitas *small-signal* pada sistem MG berasal dari berbagai sebab seperti kondisi EBT yang terus-menerus berfluktuasi, delay dari feedback controller, perubahan kecil pada kondisi pembebanan, variasi pada parameter sistem dan kurangnya damping akibat nilai inersia yang rendah [11]. Perubahan atau gangguan kecil pada nilai EBT, pembebanan dan controller gain dapat menyebabkan terjadinya osilasi yang tidak teredam sehingga menyebabkan ketidakstabilan [1], [15]–[18]. Karena stabilitas *small-signal* sangat penting untuk menjamin operasi stabil dari sistem MG, penelitian ini difokuskan pada perilaku dinamik dan kestabilan *small-signal* dari MG pada mode operasi *autonomous*.

2.2 Analisa Stokastik Stabilitas *Small-Signal* akibat Ketidakpastian EBT

Secara konvensional, metode *modal-analysis* deterministik digunakan untuk menganalisa performa stabilitas *small-signal* dari sistem tenaga elektrik. Akan tetapi dengan adanya implementasi EBT pada unit DG, metode deterministik tidak mampu

untuk memonitor semua kemungkinan skenario dan resiko terjadinya ketidakstabilan akibat fluktuasi EBT. Terlebih, pada metode deterministik, hanya skenario tertentu khususnya scenario terburuk yang menjadi perhatian utama. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, analisa stokastik dan probabilistik diperlukan agar mendapatkan gambaran lengkap dari perilaku dinamik sistem.

Berbagai metode seperti *Point Estimate Method*, *Cumulant* dan *Monte Carlo* telah digunakan untuk menganalisis probabilitas distribusi dari stabilitas *small-signal*. Diantara metode tersebut, metode *Monte Carlo* menjadi metode yang sering digunakan karena kemampuannya dalam menganalisa data dengan ukuran yang besar dengan akurasi dan fleksibilitas yang baik [4], [7], [19], [20]. Pada analisa probabilistik kestabilan *small-signal*, metode *Monte Carlo* diaplikasikan untuk memonitor tanggapan dinamik dari *eigenvalues* sistem yang berpotensi menimbulkan kondisi yang tidak stabil. Distribusi dari *eigenvalues* tersebut ditentukan berdasarkan sampling acak dan fungsi probabilitas distribusi dari data *real-time* EBT. Untuk mendapatkan hasil analisa dengan akurasi yang baik, diperlukan data EBT dalam jumlah besar dengan resolusi yang cukup.

Berdasarkan studi literature, sebagian besar penelitian yang telah dilakukan hanya menganalisis pengaruh penetrasi EBT skala besar terhadap stabilitas sistem tenaga listrik. Di lain pihak, penelitian yang menganalisis pengaruh ketidakpastian EBT pada sistem tenaga listrik yang dioperasikan secara mandiri masih perlu dilakukan. Dengan semakin meningkatnya implementasi EBT pada daerah-daerah terpencil dalam bentuk sistem MG, diperlukan analisis secara menyeluruh berkaitan dengan stabilitas *small-signal* untuk dapat merencanakan dan mendesain sistem MG yang mampu dioperasikan pada kondisi EBT yang berfluktuasi.

2.3 Pengolahan Data dengan Metode Copula

Data tahunan kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari antara tahun 2014-2015 digunakan dalam penelitian ini. Data tersebut diambil dari dua stasiun cuaca di Rockhampton, Queensland, Australia. Data kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari kemudian dipisahkan berdasarkan kondisi musim. Data musiman tersebut kemudian dibagi kembali menjadi 24 segmen data dengan resolusi setiap jam. Untuk analisa kestabilan *small signal* atau kestabilan sudut rotor sistem Microgrid pada kondisi operasi

islanding, perlu diasumsikan bahwa semua unit pembangkit dalam sistem MG berkontribusi dalam membangkitkan daya untuk mensuplai beban. Dengan demikian, pada penelitian ini, hanya operasi MG pada siang hari yang akan dianalisis ketika unit pembangkit berbasis PV dapat beroperasi. Dari hasil pengolahan data, terdapat 4 kombinasi data kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari sesuai dengan musim pada masing-masing lokasi. Data harian tersebut kemudian disusun menjadi data setiap bulan. Misalkan pada setiap bulan diasumsikan terdapat 30 hari, maka untuk setiap musim terdapat 90 data kombinasi kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari.

A. Estimasi Variabel Stokastik dengan Student t-Copula

Data harian kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari akan diaplikasikan pada fungsi Copula untuk mendapatkan distribusi stokastik dari variable yang akan digunakan untuk simulasi Monte Carlo (MCS). Fungsi Copula merupakan fungsi matematik yang menghubungkan fungsi distribusi multi variable menjadi satu fungsi distribusi marjinal [21]. Mengacu pada teori Sklar's, variable acak dari X dan Y dengan CDF masing-masing adalah F_X dan F_Y , dapat dihubungkan dengan sebuah fungsi Copula sebagaimana dituliskan dalam persamaan berikut ini:

$$F_{XY}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (1)$$

Fungsi distribusi multivariable dalam sebuah fungsi Copula dapat dipresentasikan sebagai suatu fungsi distribusi dengan mentransformasikan CDF dari suatu variable acak X dan Y . Dengan demikian, suatu distribusi variable dapat ditransformasikan ke dalam nilai sebenarnya dari variabel tersebut dengan menggunakan invers dari CDF atau *iCDF*. Transformasi dari nilai aktual variable acak X dan Y ke dalam fungsi distribusi seragam pada interval $[0,1]$ dapat dinyatakan sebagai $F_X(x) = u$ dan $F_Y(y) = v$. Dengan mengaplikasikan *iCDF*, fungsi Copula dari nilai aktual u dan v dinyatakan dengan persamaan berikut ini

$$C_{UV}(u, v) = F(F_X^{-1}(u), F_Y^{-1}(v)) \quad (2)$$

Fungsi Student't Copula digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan model stokastik dari kecepatan angin dan irradiansi sinar matahari dengan memperhitungkan keterkaitan antara dua variable acak tersebut. Fungsi Student't Copula dipilih karena kelebihanannya dibandingkan dengan Gaussian Copula dalam hal kemampuan untuk

menangkap nilai-nilai ekstrim dari suatu variabel acak [22]. Dalam mensimulasikan t-copula, multivariable acak dari vektor $\mathbf{X} \sim t_d(v, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ ditentukan berdasarkan pada fungsi densitas sebagaimana ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{v+d}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)\sqrt{(\pi v)^d |\boldsymbol{\Sigma}|}} \left(1 + \frac{(x-\boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (x-\boldsymbol{\mu})}{v}\right)^{-\frac{v+d}{2}} \quad (3)$$

Dengan v merupakan tingkat kebebasan, $\boldsymbol{\mu}$ adalah nilai rata-rata dari variabel vektor acak dan $\boldsymbol{\Sigma}$ merepresentasikan dispersi positive-definite atau scatter matrix.

Dalam proses normalisasi dari distribusi marginal, t-Copula menjadi invarian sehingga dapat diasumsikan bahwa fungsi Copula dari $\mathbf{X} \sim t_d(v, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ merupakan fungsi yang identik dengan $\mathbf{X} \sim t_d(v, \mathbf{0}, P)$. Dengan P merupakan matrik korelasi yang dinyatakan dengan dengan disperse dari matrik $\boldsymbol{\Sigma}$. Untuk proses estimasi, densitas dari t-Copula dapat ditentukan dari **Error! Reference source not found.** dan dinyatakan dengan persamaan berikut ini [22].

$$C_{v,P}^t(\mathbf{u}) = \frac{f_{v,P}(t_v^{-1}(u_1), \dots, t_v^{-1}(u_d))}{\prod_{i=1}^d f_v(t_v^{-1}(u_i))}, \mathbf{u} \in (0,1)^d \quad (4)$$

Dengan $f_{v,P}$ merupakan densitas gabungan dari $\mathbf{X} \sim t_d(v, \mathbf{0}, P)$ dan f_v merupakan densitas dari variabel distribusi standar t dengan v degrees of freedom.

Keterkaitan antara dua variabel acak dapat diukur melalui nilai korelasi (ρ_r). The rank correlation of random variables X and Y with CDFs of F_X and F_Y is defined as [23], [24].

$$\rho_r(x, y) = \rho(F_x(X), F_y(Y)) \quad (5)$$

Nilai ranking korelasi bervariasi di antara nilai [-1,1] yang menunjukkan saling keterkaitan positif dan negatif antar variabel. Keterkaitan negatif menunjukkan hubungan saling mempengaruhi yang berlawanan diantara dua variabel (peningkatan nilai satu variabel akan menyebabkan penurunan nilai variabel yang lain, hal ini berlaku sebaliknya). Keterkaitan positif mengindikasikan suatu hubungan monoton antara dua variabel (peningkatan nilai satu variabel akan menyebabkan peningkatan nilai variabel yang lain,

hal ini berlaku sebaliknya). Hasil perkalian rangking korelasi dari dua variabel stokastik dinyatakan dalam persamaan berikut ini [24].

$$\rho(X, Y) = 2 \sin\left(\frac{\pi}{6} \rho_r(X, Y)\right) \quad (6)$$

Estimasi parameter t-Copula (ν dan P) dapat didekati dengan menggunakan metode *maximum likelihood* berdasarkan maksimisasi dari gabungan distribusi probabilitas dari variabel acak sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini

$$\log L\left(\nu, P; \hat{\mathbf{U}}_1, \dots, \hat{\mathbf{U}}_n\right) = \sum_{i=1}^n \log C_{\nu, P}^t\left(\hat{\mathbf{U}}_i\right) \quad (7)$$

Dengan $C_{\nu, P}^t$ menunjukkan fungsi densitas dari t -copula sebagaimana dinyatakan dalam persamaan **Error! Reference source not found.**. Dengan mengaplikasikan invers dari *CDF* (*iCDF*) pada fungsi t -copula, estimasi nilai aktual dari variabel stokastik dapat ditentukan sebagaimana dinyatakan dalam (2).

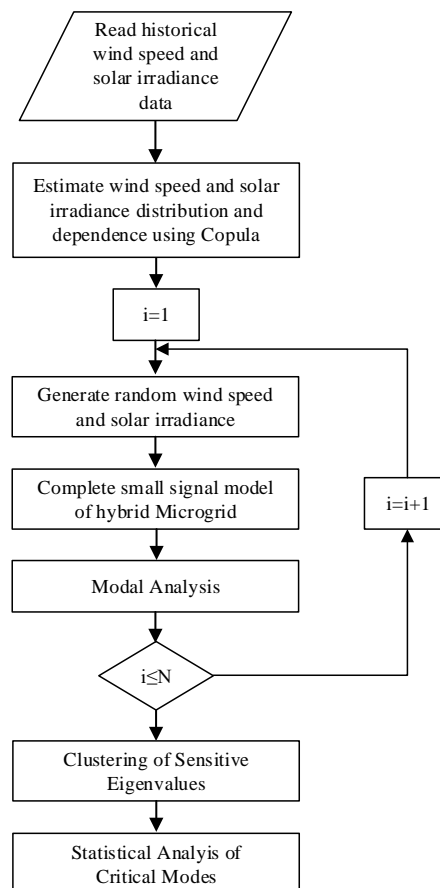
2.4 Metode Monte Carlo untuk Analisa Probabilitas

Pengaruh dari ketidakpastian kecepatan angin dan irradiasi sinar matahari pada perilaku dinamik dari sistem MG hibrid dapat dievaluasi melalui metode MCS. Estimasi fungsi distribusi dari kecepatan angin dan irradiasi sinar matahari ditentukan berdasarkan data historis dari dua stasiun cuaca di Australia. Estimasi tersebut menggunakan pendekatan fungsi t -Copula dengan memperhitungkan kondisi ketidakpastian dan keterkaitan antara dua variabel tersebut. Prosedur analisis probabilitas kestabilan small signal dengan menggunakan metode MC ditunjukkan pada gambar 2.2.

Estimasi nilai kecepatan angin dan irradiasi sinar matahari yang didapatkan dari fungsi distribusi gabungan berdasarkan metode t -Copula kemudian disampling secara acak untuk mensimulasikan kondisi operasi tak tentu dari MG. Tanggapan dinamik dari nilai eigen kritis pada berbagai titik operasi MG yang berbeda karena adanya variasi kecepatan angin dan irradiasi sinar matahari dianalisa lebih lanjut dengan menggunakan metode *Modal Analysis*. Pergerakan (trajectory) dan rasio redaman (*damping ratio*) dari eigen kritis dievaluasi untuk menentukan potensi resiko ketidakstabilan system.

Pada kondisi yang tidak menentu, eigen yang sensitif akan bergerak secara acak. Sehingga sangat sulit untuk mengobservasi tanggapan dinamik dari eigen kritis tersebut.

Secara konvensional, karakterisasi dari eigen dilakukan dengan memonitor kontribusi dari state variabel yang ada pada eigen tersebut. Akan tetapi, dalam analisa stokastik kestabilan *small signal* dengan jumlah eigen yang sangat banyak yang didapatkan dari analisa MCS, akan sangat sulit untuk menentukan dan mengidentifikasi pergerakan eigen-eigen kritis. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, analisa faktor partisipasi harus dikombinasikan dengan metode klusterisasi seperti metode klusterisasi *K-means*. Dalam penelitian ini, metode klustering *K-means* digunakan untuk mengkluster nilai-nilai eigen dengan frekuensi osilasi di bawah 2 Hz. Hal ini dilakukan karena sebagian besar eigen kritis yang secara dominan mempengaruhi kestabilan sistem dan tanggapan dinamik dari MG memiliki frekuensi osilasi di bawah 2 Hz.



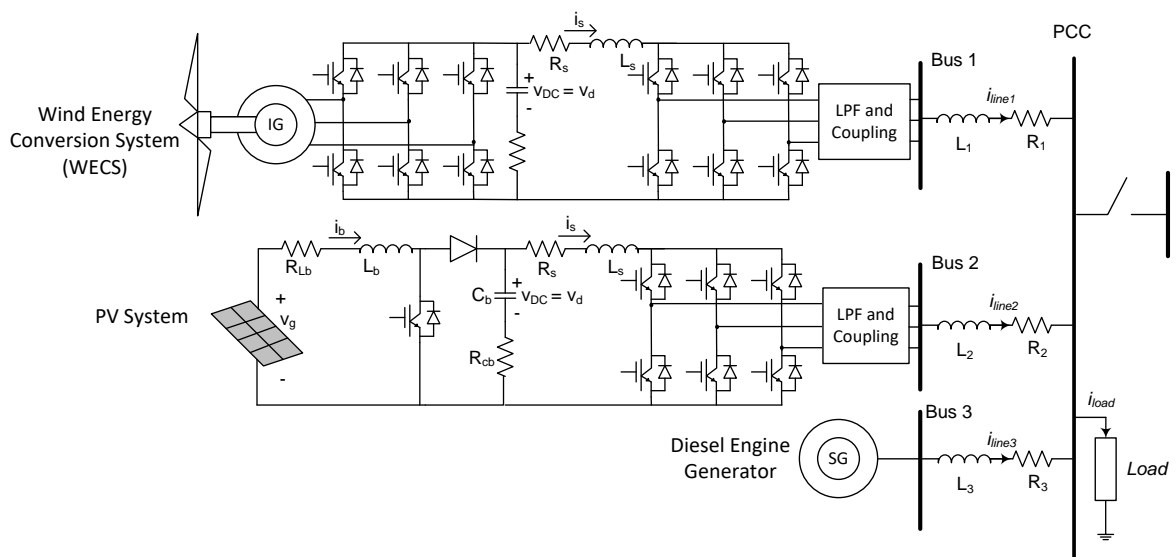
Gambar 2.2 Monte Carlo Simulation for Probability Small Signal Stability Analysis.

Pada tahap klustering, karakteristik statistic yang berhubungan dengan distribusi bagian real dan imajiner dari eigenvalue kritis, redaman dari sistem dan resiko ketidakstabilan dievaluasi. Karakter rasio redaman (ζ) dari suatu eigen yang sensitif

dilasifikasikan ke dalam tiga kategori sebagai berikut: sangat teredam (*well damped*) dengan nilai rasio redaman lebih dari 5% ($\zeta \geq 5\%$), teredam kritis (*critically damped*) meliputi suatu kondisi osilasi yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan. Kondisi ini diindikasikan dengan nilai rasio redaman antara 0%-5% ($5\% \geq \zeta \geq 0\%$). Kategori ketiga adalah kondisi tidak teredam (*undamped*) dengan nilai rasio redaman negatif ($\zeta \leq 0\%$). Kondisi ini merupakan kondisi yang menunjukkan ketidakstabilan sistem. Hal ini ditandai dengan adanya osilasi dengan amplitude yang meningkat (*small disturbance*).

2.5 Model Sistem Microgrid

Gambar 2.3 menunjukkan sistem Microgrid (MG) yang akan dianalisis pada penelitian ini. Sistem MG tersebut terdiri atas tiga pembangkit yaitu pembangkit tenaga angin (WECS), surya (PV) dan diesel (DE). Pada WECS, AC/DC/AC inverter digunakan untuk memfasilitasi antar muka antara turbine angin dan bus. Sementara, pada PV, peralatan elektronika daya yaitu DC/DC dan DC/AC inverter digunakan sebagai peralatan antar muka antara PV dengan bus lokal. Untuk mengatasi distorsi akibat munculnya komponen frekuensi tinggi karena operasi peralatan elektronika daya, L-C-L low pass filter dipasang pada WECS dan PV.



Gambar 2.3 Sistem Microgrid.

Tanggapan dinamik sistem MG sangat dipengaruhi oleh kontribusi daya dari pembangkit-pembangkit yang ada dalam sistem tersebut [25], [26]. Kontribusi daya dari setiap pembangkit ditentukan oleh skema kontrol pembagian daya (*power sharing*) diantara pembangkit-pembangkit tersebut. Metode *droop control* digunakan dalam penelitian ini untuk memfasilitasi skema pembagian daya antar pembangkit pada sistem MG. Untuk menjamin kesetimbangan antara daya yang dibangkitkan dan daya yang dibutuhkan oleh beban, maka parameter *droop control* harus dapat diubah-ubah menyesuaikan dengan kondisi aktual perubahan sumber tenaga energi baru terbarukan yaitu kecepatan angin dan iradiasi sinar matahari. Pada penelitian ini, algoritma *droop control adaptif* akan diaplikasikan pada DC/AC inveter dari WECS dan PV sehingga dapat mengakomodasi perubahan kondisi kecepatan angin dan sinar matahari dan memberikan daya optimal pada sistem MG. Skema *droop control adaptif* ditunjukkan pada gambar 2.4.

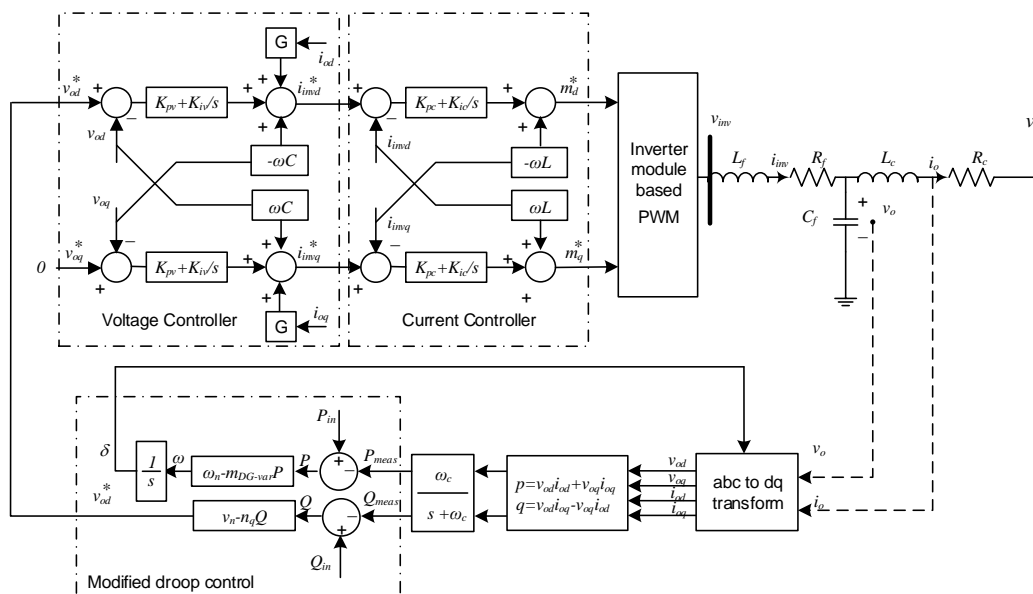


Figure 2.4 Modified droop control method.

Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.4, sistem kendali pada DC/AC inverter pada WECS dan PV terdiri atas kendali droop kontrol yang dimodifikasi, kendali tegangan dan kendali arus. Kendali droop kontrol akan mengubah parameter droop secara adaptif untuk menyediakan skema pembagian daya yang tepat sesuai dengan kondisi aktual kecepatan angin dan iradiasi sinar matahari. Referensi dari kendali pembagi daya diimplementasikan pada kendali tegangan dan arus untuk membangkitkan sinyal penyalaan peralatan elektronika daya. Perhitungan nilai referensi untuk kendali droop dimulai dengan pengukuran daya yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit. Nilai rata-rata daya aktif (ΔP_{meas}) dan reaktif (ΔQ_{meas}) ditentukan dengan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned}\Delta P_{meas} &= \left\{ \frac{\omega_c}{(s + \omega_c)} \right\} p \rightarrow \frac{d\Delta P_{meas}}{dt} = \omega_c p - \omega_c \Delta P_{meas} \\ \Delta Q_{meas} &= \left\{ \frac{\omega_c}{(s + \omega_c)} \right\} q \rightarrow \frac{d\Delta Q_{meas}}{dt} = \omega_c q - \omega_c \Delta Q_{meas}\end{aligned}\quad (8)$$

Nilai rata-rata tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai aktual yang terukur untuk mendapatkan nilai referensi frekuensi (ω^*) dan tegangan (v^*) melalui persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned}\omega^* &= \omega_n - m_{DG-var} (\Delta P_{in} - \Delta P_{meas}) \\ v_{od}^* &= v_n - n_q (\Delta Q_{in} - \Delta Q_{meas})\end{aligned}\quad (9)$$

Dengan m_{DG-var} dan n_q masing-masing merupakan parameter gain droop daya aktif dan reaktif. Pemilihan gain droop daya aktif dan reaktif dilakukan dengan mempertimbangkan akurasi skema pembagian daya, perbaikan tanggapan dinamik dan regulasi tegangan. Pada penelitian ini, hanya variasi daya aktif setiap pembangkit berbasis energi terbarukan yang akan diperhitungkan. Hal ini dikarenakan karena variasi pada daya reaktif hanya

memberikan pengaruh yang tidak signifikan terhadap kestabilan small signal sistem MG [1]–[3]. Sehingga, pada penelitian ini parameter droop daya reaktif dipertahankan konstan.

. A proposed dynamic droop parameter considering RES variation and power preserve for frequency regulation purpose is given by

$$m_{DG-var} = \left(m_{max} - (m_{max} - m_{min}) \left\{ \frac{P_{input}}{P_{max}} \right\} \right) \quad (10)$$

Where P_{input} and P_{max} represent actual input power from RES and maximum power of DGs respectively. The active droop gain control is regulated within the specified maximum (m_{max}) and minimum (m_{min}) limit.

For PV based DG, the droop gain can be calculated by substituting generated input power from PV as a function of solar irradiance [27] to (10) as given by

$$m_{PV-var} = \left(m_{max} - (m_{max} - m_{min}) \frac{V_{PV} N_p}{P_{max}} \left\{ I_{sc} \left(\frac{G_0}{G_{ref}} \right) - I_s e^{\frac{qV_{PV}}{nkTN_s}} \right\} \right) \quad (11)$$

Where G_{ref} and G_0 represent a reference and initial values of solar irradiance around a certain operating point respectively. Number of parallel and series solar panel are represented by N_p and N_s respectively. Electrical variables of PV arrays which represent short circuit current and voltage of PV array are represented by I_{sc} and V_{PV} respectively. While, T shows an ambient temperature. n and k represent constants values of PV arrays.

Similarly, for wind based DG unit, the droop gain can be calculated by substituting generated input power from WECS as a function of actual wind speed [28] to (10) as given by

$$m_{WECS-var} = \left(m_{max} - (m_{max} - m_{min}) \left\{ \frac{0.5 \rho C_{opt} (\lambda_{opt}, \beta) A_r v_{w0}^3}{P_{max}} \right\} \right) \quad (12)$$

Where v_{w0} represents an initial condition of wind speed around a certain operating point. It is assumed that power input from a certain wind speed is a function of a given wind speed with constant tip speed ratio and blade pitch angle. C_{opt} represents an efficiency constant of wind turbine.

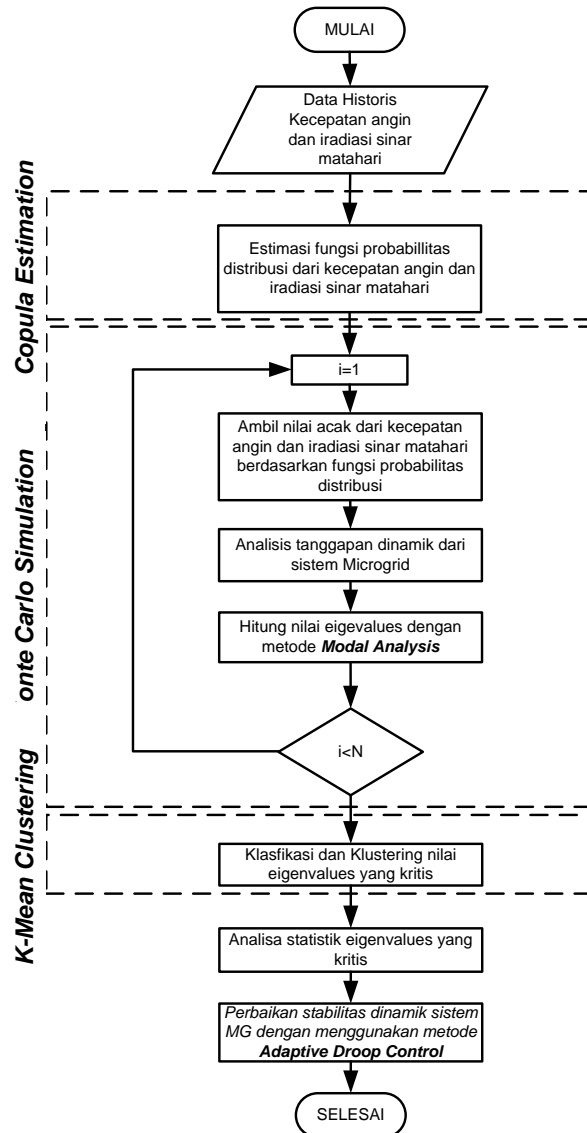
Development procedure of state space model of the investigated MG system, comprising of WECS, PV and Diesel engine based DG units, is represented in [25], [26]. The complete model of the hybrid MG system incorporates state space model of solar array, wind turbine, electrical machines, power electronic devices, controller, distribution network and lumped load. The dynamic behaviour of the MG system which is reflected in variation of critical eigenvalues, is then investigated under uncertain condition of wind speed and solar irradiance.

BAB 3

Metodologi Penelitian

Pengaruh kondisi fluktuatif dan ketidakpastian EBT pada tanggapan dinamik sistem MG dievaluasi dengan menggunakan metode *Monte Carlo*. Untuk melakukan simulasi *Monte Carlo*, terlebih dahulu distribusi probabilitas EBT ditentukan berdasarkan data historis dari stasiun cuaca. Kondisi kestabilan dari sistem MG kemudian dianalisis untuk

menentukan nilai eigenvalues kritis. Secara garis besar, kerangka kerja penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada gambar 2, prosedur penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Persiapan penelitian

Pada tahap ini, dilakukan kajian pustaka dan pengumpulan data EBT dalam bentuk data historis kecepatan angin dan iradiasi sinar matahari selama satu tahun.

2. Pengolahan Data dan Pemodelan Sistem MG

Pada tahap ini, dilakukan estimasi distribusi probabilitas EBT berdasarkan data historis yang telah diperoleh. Untuk mendapatkan hasil estimasi yang akurat, proses estimasi fungsi distribusi probabilitas EBT dilakukan dengan menggunakan *Copula Estimation method*. Estimasi fungsi distribusi tersebut kemudian diaplikasikan pada model sistem MG yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya [26], [29], [30].

3. Analisa respon dinamik dari sistem MG

Analisa respon dinamik dari sistem MG dilakukan dengan mengambil secara acak nilai EBT berdasarkan fungsi probabilitas distribusi yang telah ditentukan.

4. Perhitungan eigenvalues kritis

Dari setiap kemungkinan skenario nilai EBT, eigenvalues kritis dihitung dengan menggunakan metode *Modal Analysis*.

5. Klasifikasi dan klastering nilai eigenvalues

Nilai eigenvalues dari setiap skenario kemudian diklasifikan untuk menentukan probabilitas dan resiko terjadi ketidakstabilan sistem MG ketika dioperasikan pada berbagai nilai EBT. Prosedur klasifikasi dan klastering dilakukan dengan menggunakan metode *K-Mean Clustering*.

6. Perbaikan Stabilitas Dinamik

Dari hasil evaluasi perilaku dinamik sistem MG pada EBT yang berfluktuasi, kemudian dilakukan perbaikan stabilitas dinamik dengan menggunakan metode *Adaptive Droop Control*.

7. Publikasi

Hasil yang didapatkan akan dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

The small signal model of hybrid MG comprising of 3 MVA WECS, PV and DE generator, as illustrated in fig.3, was investigated. Parameters of the proposed RES based DGs and DE were derived from [25], [26]. Detailed hybrid MG model combined with the state space model of the network impedance to supply aggregated 5 MW central load. Since stability in MG during islanding operation is significantly influenced by dynamic power sharing scheme among DGs, the modal analysis in this study was focused on critical eigenvalues corresponded to the power output of each DGs in MG considering uncertainties of wind speed and solar irradiance. Statistical features of critical eigenvalues related to its damping ratio and oscillatory frequency distributions are thoroughly observed to assess the system dynamic performance and risk of instability events.

A. Wind Speed and Solar Irradiance Estimation

Annual wind speed data and solar irradiation from two different locations in Australia are considered. From collected hourly measurement of RES data, it is difficult to fit the stochastic RES data into a standard distribution function. Moreover, to provide better fitting RES data, possible correlation or dependence between wind speed and solar irradiance should be taken into account in developing proper distribution RES functions. Due to the limitation of the standard functions, the RES estimation can be approached using bivariate distribution function method such as Copula. The student t -copula considering the possible dependence and stochastic nature characteristic of RES is employed in the proposed modelling strategy. Obtained fitting data results of wind speed and irradiance from the proposed Copula are compared with the conventional Weibull and Gaussian Mixture distribution functions.

The connection between wind speed and solar irradiation might emerge due to their dependencies to the weather conditions. The rank correlation between seasonal wind speed and solar irradiance in both locations is presented in Table 1. It was monitored that connection between those two stochastic RES variables varied accordingly either in complementary or monotonic trends, indicated by negative and positive rank correlation respectively. In general, a weak dependence between wind speed and solar irradiance

existed in both locations, indicated by low-rank correlations varied from -0.0118 to 0.3. While higher correlations observed during fall season in location 2 as indicated by 0.3172 of rank correlation.

Table 1 Rank Correlation between wind speed and solar irradiance

Seasons	Location 1	Location 2
Jan-Mar	0.1297	0.0765
Apr-Jun	0.1991	0.3172
Jul-Sep	0.0684	0.1726
Oct-Des	-0.0118	-0.0146

Root Mean Square Error (RMSE) between the CDF of actual and simulated RES values is employed for evaluating the obtained results from Copula and standard distribution methods. The calculation of RMSE is given by the following equation

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} (CDF_{act}^j - CDF_{est}^j)^2} \quad (13)$$

Where N_d represents number of data sampling. The CDF_{act}^j and CDF_{est}^j respectively corresponded to actual and estimated RES values.

Table 2 Comparison of RMSE for Copula, Weibull and Gaussian Mixture in Location 1

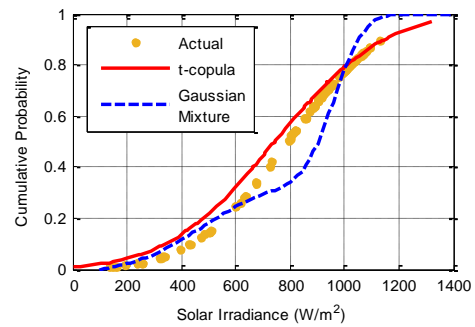
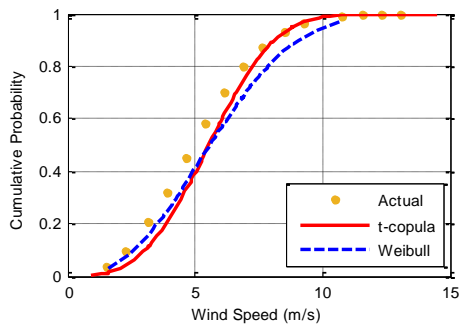
Estimation Method	Summer		Fall		Winter		Spring	
	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance
<i>t</i> -copula	0.08717	0.033221	0.05679	0.039828	0.067773	0.048591	0.07445	0.028225
Weibull	0.13760	--	0.10192	--	0.087687	--	0.08015	--
Gaussian Mixture	--	0.145305	--	0.172018	--	0.197105	--	0.309846

Table 3 Comparison of RMSE for Copula, Weibull and Gaussian Mixture in Location 2

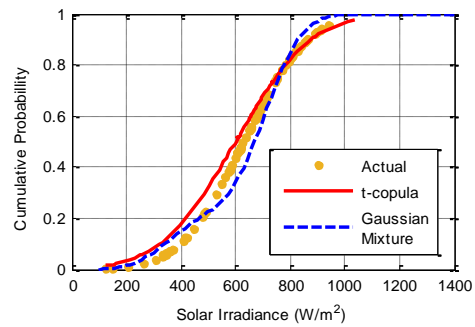
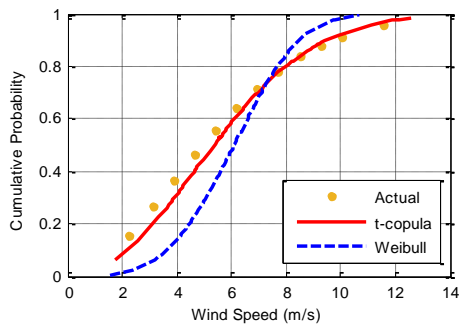
Estimation Method	Summer		Fall		Winter		Spring	
	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance	Wind speed	Solar Irradiance
<i>t</i> -copula	0.06795	0.037029	0.06357	0.043197	0.04145	0.067203	0.05623	0.037533
Weibull	0.16623	--	0.100875	--	0.085699	--	0.109611	--
Gaussian Mixture	--	0.141647	--	0.174367	--	0.16809	--	0.239005

The RMSE values were calculated for each CDFs from *t*-copula, Weibull and Gaussian Mixture Distributions. Table 2 and 3 represents the obtained RMSE values of seasonal wind speed and irradiance CDFs from location 1 and 2 respectively. From the results presented in both tables, it was evident that proposed copula method provides

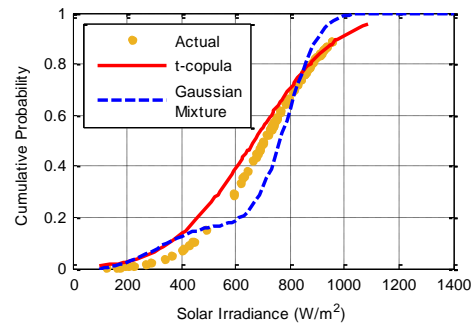
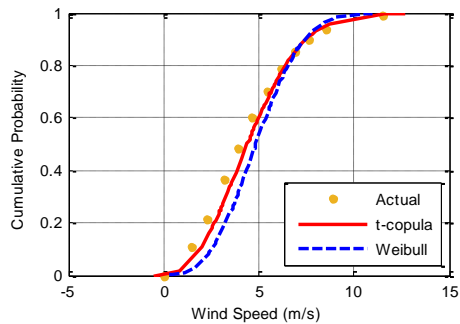
better performance than other standard distribution functions in modelling stochastic variables of wind speed and solar irradiance. Much lower RMSE values from t -copula than Weibull and Gaussian Mixture distribution functions were observed. Moreover, the graphical analysis corresponded to comparison among copula, Weibull and Gaussian Mixture methods in estimating stochastic variables from its actual values are presented in Fig.5 and 6. It was obvious that t -copula method provided more accurate data fitting than other technique using standard distribution functions, indicated by good alignment of obtained CDF values from t -copula to actual wind speed and solar irradiance CDFs compared to other estimation methods. Estimated actual values of wind speed and irradiance were then generated by applying inverse CDF ($iCDF$) to the t -copula function.



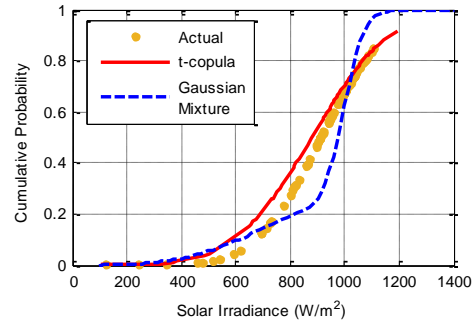
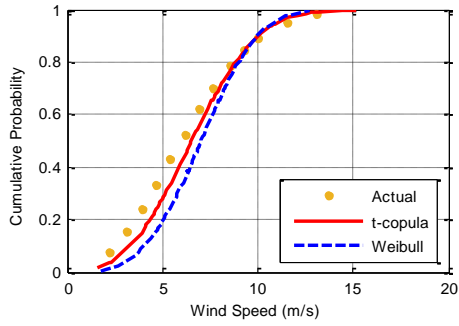
a.



b.

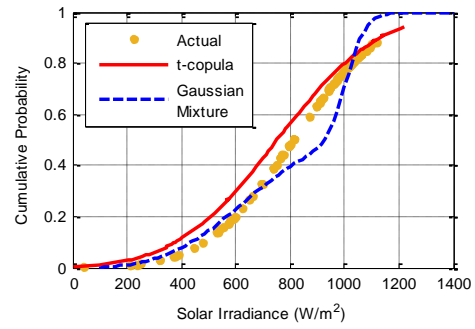
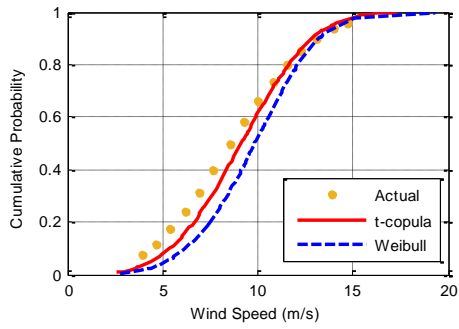


c.

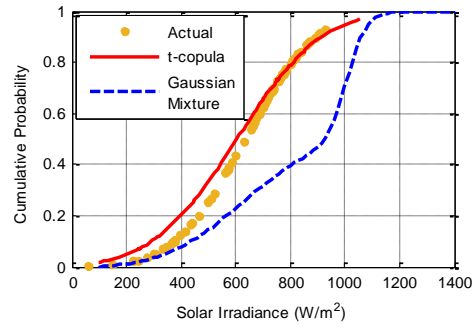
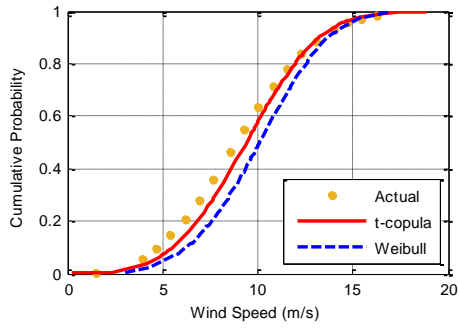


d.

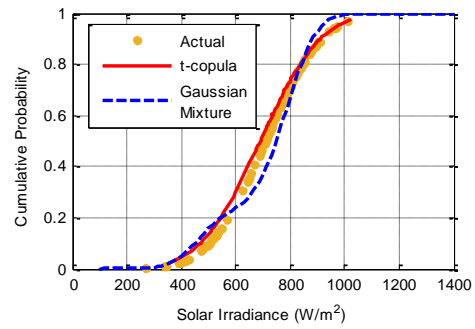
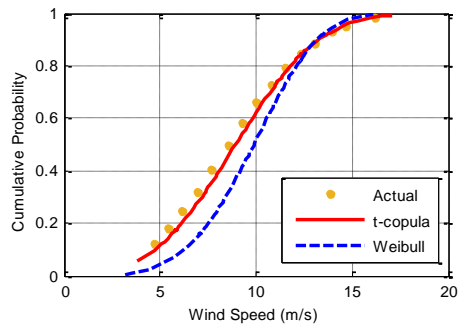
Figure 5 CDFs of wind speed and solar irradiance from location-1 during (a) summer, (b) fall, (c) winter and (d) spring.



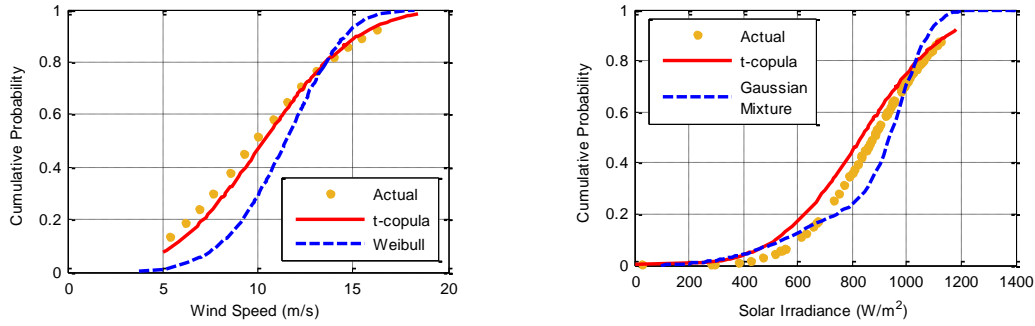
a.



b.



c.



d.

Figure 6 CDFs of wind speed and solar irradiance from location-2 during (a) summer, (b) fall, (c) winter and (d) spring.

Statistical analysis corresponding to the expected values and standard deviation of the estimated wind speed and solar irradiance in location 1 and 2 are presented in Table 4. Higher mean and standard deviation values of wind speed in location 2 than location 1 suggested that the location 2 had more fluctuating wind speed situation throughout the year. Moreover, it was also observed that solar irradiation was relatively similar in the two areas.

Table 4. Statistical analysis of four solar irradiance regimes.

Period	Location 1				Location 2			
	Wind Speed		Solar Irradiance		Wind Speed		Solar Irradiance	
	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.
Jan-Mar	7.635	3.481	790.029	285.271	9.752	3.132	809.398	270.201
Apr-Jun	8.111	2.418	628.550	191.848	10.043	3.170	633.202	211.635
Jul-Sep	6.515	2.503	704.904	216.303	9.788	3.051	707.772	169.767
Oct-Dec	9.378	3.201	912.545	191.313	11.348	2.748	874.148	224.889

B. Probabilistic Small Signal Stability Analysis Considering RES Uncertainties

Stochastic data from *t*-copula technique were applied to investigate dynamic behavior of the MG system under uncertain conditions of wind speed and irradiance. During autonomous mode, all DG unit in MG participated in the power-sharing scheme. To investigate effects of uncertain RES condition on the oscillatory and dynamic response of MG, it was assumed that WECS and PV based DGs dominantly contributed in supplying power for the load demand. While DE was operated as a reference DG unit which provides a reference synchronization signal and overcomes the shortfall power from those two RES based DG units.

Power contribution of WECS and PV based DGs strongly correlated to the wind speed and solar irradiance conditions respectively and setting of droop controller. Hence, the droop gain should be adjusted continuously within its maximum and minimum setting to manage with RES variation. In this paper, a maximum and minimum active power droop gain were set at 8% and 4% respectively. As wind speed and solar irradiance fluctuated, the droop gain would vary accordingly, result in a change of operating points and power contributions of each DG units. When a stable operating point was perturbed, an oscillatory condition emerges until a new stable operating point was attained. However, if system damping was not sufficient to damp the oscillation, critical or even unstable conditions might happen.

Since power contribution from WECS and PV predominantly affected MG stability, the modal analysis was focused on critical modes correlated to output power from those DG units. Non-linear dynamic behavior of the critical modes should be monitored to evaluate the small signal stability performance of hybrid MG. According to small signal stability analysis in [20], [21], The investigation focused on critical modes corresponded to the output power of WECS and PV based DGs which represented as $\lambda_{42,43}$ and $\lambda_{45,46}$ respectively. Participation factor analysis suggested that critical modes related to DG unit power output were characterized by low-frequency oscillation as presented in Table 5. Moreover, it was also monitored that WECS and PV were not fully decoupled, indicated by contributions of active and reactive power output from WECS and PV on critical modes of $\lambda_{42,43}$ and $\lambda_{45,46}$. In base case scenario, both of critical modes were stable with the damping ratio more than 5%. However, when hybrid MG was operated under fluctuating conditions of wind speed and solar irradiance, the corresponded modes responded randomly and potentially caused instability.

Table 5 Investigated critical modes.

Eigenvalues	Complex Values	Frequency (Hz)	Damping (%)	Participation Factor
$\lambda_{42,43}$	-0.399±7.680	1.221	5.199	$P_{WECS}, Q_{WECS}, P_{PV}, Q_{PV}$
$\lambda_{45,46}$	-1.382±10.834	1.724	14.219	$P_{PV}, Q_{PV}, P_{WECS}, Q_{WECS},$

Small signal stability in MG considering uncertainties of wind speed and solar irradiance was assessed through MCS. Estimated RES distribution functions obtained from the proposed copula method was employed to generate 10000 samples of wind speed and solar irradiance. The generated RES data were then randomly sampled through MC simulation to realize practical scenarios of uncertainties in MG and determine the system eigenvalues in all possible circumstances of wind speed and irradiance. Under RES variations, the system eigenvalues responded randomly. Hence it was difficult to identify trajectories of the observed modes. Clustering technique such as spectral K-mean can be implemented to extract the investigated modes from system eigenvalues. The proposed clustering method iteratively calculated the affinity matrix of system eigenvalues and determine the eigenvalues cluster based on the Euclidean distance between two eigenvalues. The eigen-clusters were then determined based on the minimum distance between eigenvalues. When a specific cluster of investigated eigenvalues was determined, statistical features regarding the distribution of real and imaginary eigenvalues components, damping ratio and risk of stability can be evaluated. Critical eigenvalues in hybrid MG were characterized by low-frequency oscillation under 2 Hz as presented in Table 4. Hence the K-mean clustering technique was applied to cluster the eigenvalues based on the predefined oscillatory frequency of critical modes. The obtained eigen-cluster was then confirmed with participation factor analysis to determine the investigated modes corresponded to output power from RES based DGs in hybrid MG.

Statistical properties and distribution of critical modes from two locations involving the mean and standard deviations of the real part, imaginary part and damping ratio are presented in Table 6. Under wind speed and solar irradiance fluctuations, the critical modes deviated differently. The critical modes corresponded to PV based DG unit ($\lambda_{45,46}$) diverged moderately as denoted by low standard deviation of those critical modes. A low standard deviation implied that only short movement of eigenvalues was experienced during fluctuation of irradiance. Conversely, high standard deviations related to critical modes from WECS was monitored, denoted a significant dispersion of those critical modes under wind speed variations. It was suggested that the change in wind speed significantly affected the dynamic response of hybrid MG than the variations of solar irradiance.

Table 6 Distribution and Statistical Properties of Critical Modes

Location 1												
Period	$\lambda_{42,43}$						$\lambda_{45,46}$					
	Real		Imaginary		Damping		Real		Imaginary		Damping	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
Jan-Mar	-1.532	0.226	10.814	0.067	14.034	2.104	-0.502	0.391	6.547	1.748	6.133	20.766
Apr-Jun	-1.527	0.171	10.801	0.046	14.006	1.581	-0.586	0.176	6.697	1.126	8.669	9.127
Jul-Sep	-1.616	0.148	10.789	0.039	14.818	1.374	-0.506	0.216	7.094	1.071	6.404	12.149
Oct-Dec	-1.421	0.226	10.842	0.072	12.992	2.103	-0.587	0.273	5.975	1.865	8.837	21.879
Location 2												
Period	$\lambda_{42,43}$						$\lambda_{45,46}$					
	Real		Imaginary		Damping		Real		Imaginary		Damping	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
Jan-Mar	-1.393	0.221	10.846	0.066	12.741	2.057	-0.606	0.272	5.785	1.742	9.492	16.911
Apr-Jun	-1.376	0.226	10.845	0.072	12.598	2.113	-0.587	0.322	5.619	1.837	8.509	20.231
Jul-Sep	-1.396	0.222	10.841	0.068	12.778	2.066	-0.604	0.262	5.789	1.754	9.373	17.887
Oct-Dec	-1.278	0.209	10.883	0.076	11.674	1.963	-0.561	0.435	4.887	2.078	8.058	29.813

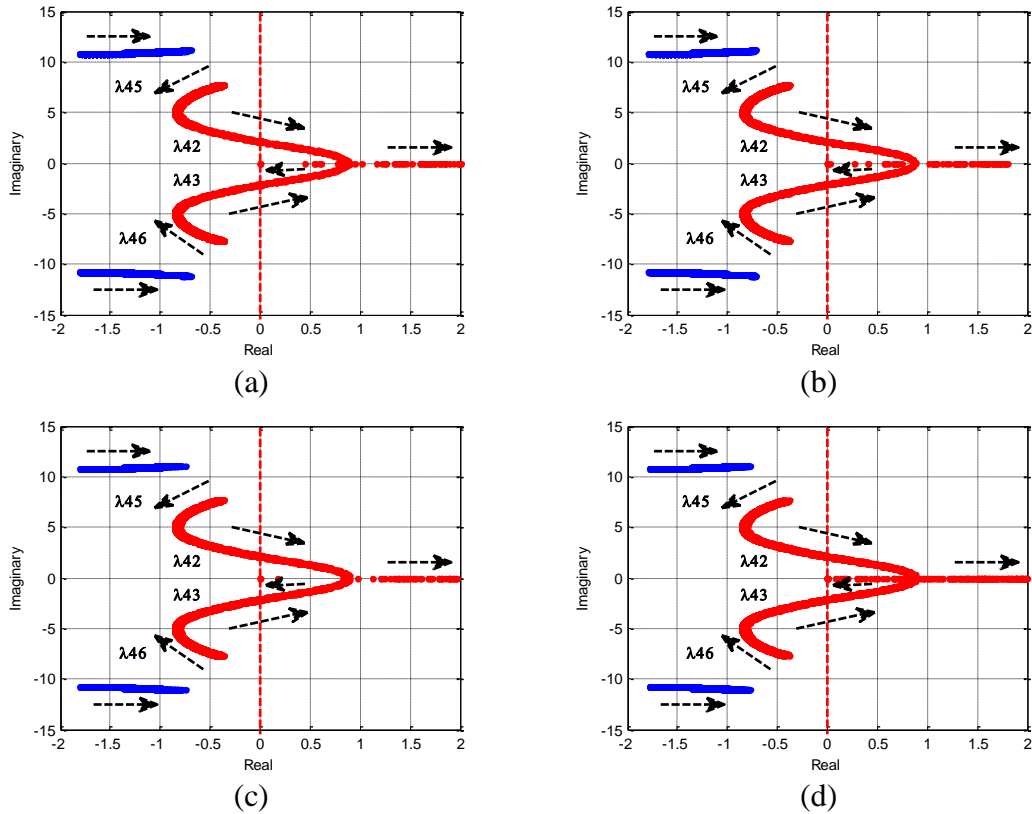


Figure 7 Trajectories of sensitive modes from location 1 (a and b) and location 2 (c and d) under RES variations

Fig.7 represents samples of critical modes trajectories in a certain season and hour from both areas. The critical modes corresponded to the output power of WECS and PV

based DGs were represented as $\lambda_{42,43}$ and $\lambda_{45,46}$ respectively. Variation of solar irradiance influenced the dynamic response of MG considerably. As solar irradiance randomly increased, the eigenvalues of $\lambda_{42,43}$ departed toward the right half complex plane, indicated deterioration of small signal stability performance. Even though the less damped situation was monitored under irradiance variations, the corresponded modes relatively stable on the left half side of the complex plane. The system dynamic response suffered when MG was operated under wind speed variations. Sensitive modes of $\lambda_{45,46}$ moved extensively to the right-hand side of the complex plane as wind speed increased. Critical situations with low oscillatory frequency were monitored as sensitive modes departed toward the right-hand side of the complex plane. The unstable situation occurred when the wind speed was more than 15 m/s. The frequency of WECS modes significantly reduced from 1.21 Hz to 0.4 Hz at higher wind speed values. Even in a certain unstable circumstance, the sensitive modes correspond the hybrid MG aligned in a certain point and separated into two real modes. This situation leads to non-oscillatory instability which results in a chaotic situation in MG.

System damping was assessed to evaluate the hybrid MG oscillatory instability risk under the uncertain condition of RES. Assessment of system dynamic response was conducted by evaluating the distribution of damping ratio of the critical mode for every operating state given by random values of wind speed and solar irradiance. Hybrid MG operation can be clustered into three operating states based on the damping condition of the critical modes. The first operating state is a stable MG operation which is related to a well damped dynamic response of islanding hybrid MG. This operating state is characterized by critical modes damping ratio more than ($\zeta \geq 5\%$). Second MG operating state is a marginally stable state. In this region, less to the critically damped situation is monitored. The damping ratio of critical modes varied in the range of 0% to 5% ($0\% \leq \zeta \leq 5\%$). The undamped oscillation with the continuous increase of oscillatory magnitude is clustered into the third unstable MG operating state. In this region, negative damping ratio ($\zeta < 0\%$) was observed.

Fig.8 represents cumulative probability distribution of WECS and PV critical modes damping ratio from location 1 and location 2. From critical eigenvalues CDF, it was monitored that when the investigated MG system was subjected to solar irradiance

variations, the damping performance can be maintained above the critical limits. A 100% well-damped system dynamic response was observed, characterized by more than 5% damping ratio. Conversely, hybrid MG suffered from wind speed uncertainties. The poorly damped oscillatory conditions possibly occurred when the hybrid MG was subjected to wind speed variations. As more fluctuating condition under wind speed variations was experienced, the stability margin decreased considerably. From 10000 generated operating condition samples, a number of critical conditions were identified. In location 1, it was monitored that probability of critical situation with damping ratio in the range of 0% to 5% was 0.004 which was equal to 40 critical events. While around 500 or 0.05 probability of unstable events with negative damping took place in location 1. More critical situations were identified in location 2. The 0.095 possibility of instability or 950 unstable events occurred. While around 150 marginally stable situations or 0.015 probability events with damping ratio between 0% and 5% were monitored.

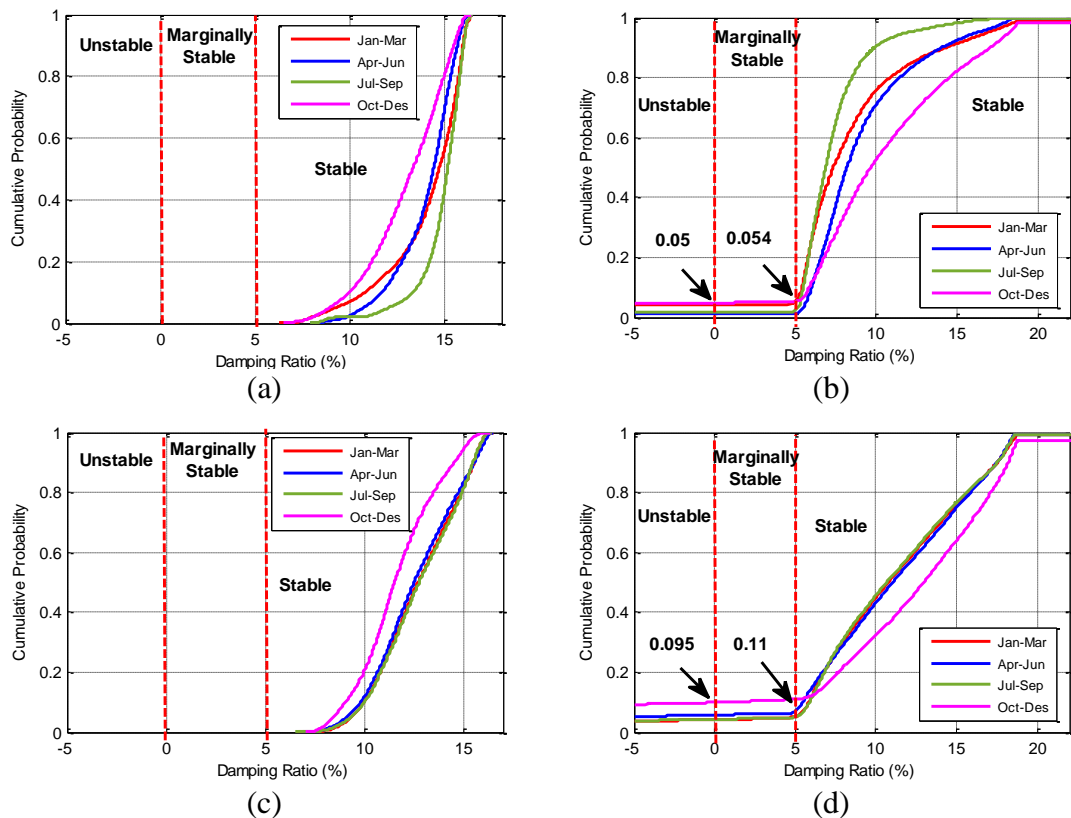


Figure 8 CDF of WECS and PV critical modes damping ratio from location 1 (a and b) and location 2 (c and d).

BAB 5

KESIMPULAN

Effects of RES uncertainties in small signal stability performance of islanding operation of hybrid MG is presented in this paper. Student's t - Copula method is applied for estimating the distribution of wind speed and solar irradiance variations, considering their dependencies. It is reported that the proposed estimation method provides more accurate result in estimating the PDF of wind speed and solar irradiance than conventional estimation methods such as Weibull and Gaussian Mixture. The estimated wind speed and solar irradiance from two locations were then applied to hybrid MG system to investigate the small signal stability performance of the investigated MG system under RES changes. From the probabilistic study, it was suggested that the presence of wind speed and solar irradiance uncertainties influence the MG oscillatory stability and dynamic response. Uncertain condition of wind speed introduced more severe effect on system damping than solar irradiation variation, indicated by the extensive movement of the critical eigenvalues toward the imaginary axis.

REFERENCES

- [1] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, 2007.
- [2] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2346–2351, 2008.
- [3] Y. A.-R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2806–2816, 2008.
- [4] J. L. Rueda and D. G. Colomé, "Probabilistic performance indexes for small signal stability enhancement in weak wind-hydro-thermal power systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2009.
- [5] H. Ahmadi and H. Seifi, "Probabilistic tuning of Power System Stabilizers considering the wind farm generation uncertainty," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 565–576, 2014.
- [6] G. L. a, H. Yuea, M. Zhoua, and J. Weib, "Probabilistic assessment of oscillatory stability margin of power systems incorporating wind farms," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 58, pp. 47–56, 2014.
- [7] J. L. Rueda, D. G. Colomé, and I. Erlich, "Assessment and Enhancement of Small Signal Stability Considering Uncertainties," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, 2009.
- [8] H. Yue, G. Li, and M. Zhou, "A Probabilistic Approach to Small Signal Stability Analysis of Power Systems with Correlated Wind Sources," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 8, pp. 742–751, 2013.

- [9] T. R. Ayodele, "Analysis of Monte Carlo Simulation Sampling Techniques on Small Signal Stability of Wind Generator- Connected Power System," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 11, No. 4, no. 4, pp. 563–583, 2016.
- [10] X. Y. Bian, Y. Geng, K. L. Lo, Y. Fu, and Q. B. Zhou, "Coordination of PSSs and SVC Damping Controller to Improve Probabilistic Small-Signal Stability of Power System With Wind Farm Integration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, 2016.
- [11] R. Majumder, "Some Aspects of Stability in Microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3243–3252.
- [12] M. Hamzeh, M. Ghafouri, H. Karimi, K. Sheshyekani, and J. M. Guerrero, "Power Oscillations Damping in DC Microgrids," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 3, pp. 970–980, 2016.
- [13] Z. Shuai *et al.*, "Microgrid stability: Classification and a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 167–179, 2016.
- [14] J. G. Slootweg and W. L. Kling, "Impacts of Distributed Generation on Power System Transient Stability," in *Engineering Society Summer Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 862–867.
- [15] N. Kroutikova, C. A. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "State-space model of grid-connected inverters under current control mode," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 329–338, 2007.
- [16] T. C. Green and M. Profanovic, "Control of Inverter Based Micro Grid," *Sci. Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, pp. 1204–1213, 2007.
- [17] F. Katerei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, "Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources," *IET Gen. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 369–378, 2007.
- [18] A. Krismanto, N. Mithulananthan, and K. Y. Lee, "Comprehensive Modelling and Small Signal Stability Analysis of RES-based Microgrid," *9th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems CPES*. Elsevier, New Delhi, India, pp.

282–287, 2015.

- [19] J. L. Rueda and F. Shewarega, “Small signal stability of power systems with large scale wind power integration,” *13th ERIAC Regional Iberoamericano DE CIGRE*. Puerto de Iguazu, Argentina, 2009.
- [20] X. Xu, T. Lin, and X. Zha, “Probabilistic Analysis of Small Signal Stability of Microgrid Using Point Estimate Method,” *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on*. 2009.
- [21] R. B. Nelsen, *An Introduction to Copulas*. New York: Springer, 2006.
- [22] S. Demarta and A. J. McNeil, “The t Copula and Related Copulas,” *Int. Stat. Rev. / Rev. Int. Stat.*, vol. 73, no. 1, pp. 111–129, 2005.
- [23] M. M. Othman, A. Y. Abdelaziz, Y. G. Hegazi, and W. El-Khattam, “Approach for modelling stochastically dependent renewable energy-based generators using diagonal band copula,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 7, pp. 809–820, 2015.
- [24] G. Papaefthymiou and D. Kurowicka, “Using Copulas for Modeling Stochastic Dependence in Power System Uncertainty Analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 40–49, 2009.
- [25] A. U. Krismanto, N. Mithulananthan, and O. Krause, “Stability of Renewable Energy based Microgrid in Autonomous Operation,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 13, pp. 134–147, 2018.
- [26] A. U. Krismanto and M. Nadarajah, “Identification of Modal Interaction and Small Signal Stability in Autonomous Microgrid Operation,” *IET Gen. Transm. Distrib.*, 2017.
- [27] Y. T. Tan, D. S. Kirschen, and N. Jenkins, “A Model of PV Generation Suitable for Stability Analysis,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 748–755, 2004.
- [28] C. E. Ugalde-Loo, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, “State-Space Modeling of Wind Turbine Generators for Power System Studies,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, pp. 223–232, 2013.

- [29] A. U. Krismanto and N.Mithulanthan, “Probabilistic Small Signal Stability Analysis of Autonomous Wind-Diesel Microgrid,” *ISGT Asia Pacific 2017*. Auckland, New Zealand, 2017.
- [30] A. U. Krismanto, N. Mithulanthan, and A. Lomi, “Dynamic droop control in microgrid for stability enhancement considering RES variation,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2017, pp. 1–6.