

MARKOV CHAIN MONTE CARLO UNTUK PLTS-BATERAI TERDISTRIBUSI DALAM PENENTUAN KAPASITAS *HOSTING* STOKASTIK

Proposal Penelitian Disertasi

untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana S-3

Program Studi Doktor Teknik Elektro
Konsentrasi Sistem Tenaga Listrik
Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi



diajukan oleh

Wijaya Yudha Atmaja
20/468298/STK/00830

Kepada

PROGRAM PASCASARJANA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA

2021

Proposal Penelitian Disertasi

**MARKOV CHAIN MONTE CARLO UNTUK PLTS-BATERAI
TERDISTRIBUSI DALAM PENENTUAN KAPASITAS *HOSTING*
STOKASTIK**

Dipersiapkan dan disusun oleh

Wijaya Yudha Atmaja

20/468298/STK/00830

Telah disetujui oleh

Tanda Tangan

Tanggal



Ir. Sarjiya, S.T., M.T., Ph.D., IPU.

29 Januari 2020

Promotor



Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.

29 Januari 2020

Ko-Promotor

ABSTRAK

Karena penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap berskala besar dapat memberikan dampak negatif ke jaringan distribusi tegangan rendah, penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap perlu diteliti. Penelitian sebelumnya belum memasukkan model stokastik dari profil beban dan daya keluaran PLTS. Hal ini menyebabkan, representasi ketidakpastian sebagai karakteristik alami penetrasi PLTS belum sepenuhnya tercapai. Pelibatan penetrasi PLTS-PLTS yang terintegrasi dengan baterai (PLTS-baterai) juga perlu diteliti. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan penentuan kapasitas hosting pada penetrasi PLTS atap dan baterai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS. Salah satu tantangan dari penelitian ini adalah beban dan waktu komputasi, terutama ketika dilakukan penambahan variabel ketidakpastian. Oleh karena itu, Markov Chain Monte Carlo diusulkan dalam penelitian ini. Hipotesis penelitian ini adalah metode yang diusulkan dapat meningkatkan tingkat representatif dan akurasi tanpa menambah beban komputasi, jika dibandingkan dengan metode sebelumnya yaitu Monte Carlo.

Kata kunci— Dampak negatif, jaringan distribusi, Markov Chain Monte Carlo, kapasitas *hosting*, penetrasi PLTS atap.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1 Kerangka Analisis Probabilistik untuk Ketidakpastian Masukan	7
2.1.2 Batasan Level Tegangan Sistem Distribusi Tegangan Rendah.....	9
2.1.3 Kapasitas <i>Hosting</i> Stokastik	12
2.1.4 Prosedur Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Stokastik	16
2.1.5 Konfigurasi dan Kendali Sistem Baterai pada Penetrasi PLTS-Baterai	22
2.2 Landasan Teori	25
2.2.1 Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS Atap pada Penetrasi Skala Besar.....	26
2.2.2 Penentuan Kapasitas <i>Hosting</i> Berbasis Monte Carlo	26
2.2.3 Konsep Markov Chain Monte Carlo	27
2.2.3.1 Proses <i>Markov</i>	28
2.2.3.2 Probabilitas Transisi Dari Proses <i>Markov</i>	28
2.2.3.3 Markov Chain Monte Carlo.....	28
2.2.4 Jumlah Proses Acak.....	29
2.2.5 Kerangka Analisis Runtun Waktu	29
2.2.6 Studi Akurasi	30
2.3 Hipotesis	30
BAB III USULAN METODE	31
3.1 Pembentukan Strategi Penetrasi	32

3.1.1	Skenario Penetrasi.....	33
3.1.2	<i>States</i> dari Markov Chain Monte Carlo	33
3.1.3	Proses Penetrasi.....	33
3.1.4	Pelanggan Penetrasi.....	33
3.1.5	Ukuran Daya Penetrasi.....	34
3.1.6	Level Penetrasi Pelanggan.....	34
3.1.7	Level Penetrasi Daya	35
3.1.8	Lokasi Penetrasi	35
3.2	Pembentukan Markov Chain Monte Carlo	36
3.2.1	Matriks Probabilitas Transisi	36
3.2.2	Jumlah Simulasi Markov Chain Monte Carlo	37
3.2.3	Batas Operasi Sistem Distribusi	37
3.2.4	Kapasitas <i>Hosting</i> PLTS	37
3.3	Pembentukan Algoritme	38
BAB IV JADWAL PENELITIAN		41
DAFTAR PUSTAKA		42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penetrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap ke jaringan distribusi tenaga listrik yang semakin tinggi [1,2] meningkatkan kebutuhan untuk menginvestigasi dampak negatif yang diterima oleh jaringan distribusi [3–9]. Pada level tertentu, penetrasi PLTS atap berpotensi menyebabkan masalah pada kinerja operasi sistem distribusi tenaga listrik, seperti tegangan lebih [3–7], aliran daya balik [3, 8], pelanggaran kapasitas termal konduktor [4, 9], dan lain-lain. Untuk mencegah terjadinya permasalahan-permasalahan tersebut, penentuan kapasitas *hosting* sistem distribusi dalam menerima penetrasi PLTS atap perlu dilakukan. Kapasitas *hosting* didefinisikan sebagai jumlah maksimal dari PLTS-PLTS atap atau pembangkit lain yang diintegrasikan ke jaringan distribusi sebelum terjadi masalah atau gangguan operasi pada jaringan tersebut [10]. Dalam hal ini, karakteristik-karakteristik natural dari penetrasi PLTS atap ke jaringan distribusi tenaga listrik tegangan rendah memberikan tantangan terkait mekanisme penentuan kapasitas *hosting* tersebut.

Tantangan utama dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap adalah untuk mendapatkan hasil yang representatif terhadap kondisi riil penetrasi PLTS atap di jaringan distribusi tegangan rendah. Hasil yang representatif tersebut perlu dicapai agar dapat dijadikan dasar yang sesuai bagi perencana dan operator sistem distribusi tenaga listrik dalam menghadapi peningkatan penetrasi PLTS yang pesat. Kapasitas *hosting* PLTS atap yang representatif tercapai jika karakteristik ketidakpastian dalam proses penetrasi PLTS atap dapat dimodelkan dengan tepat [11–13]. Karakteristik ketidakpastian yang melekat pada sumber-sumber PLTS antara lain ketidakpastian ukuran daya dan lokasi integrasi PLTS atap pada jaringan distribusi [14]. Selain itu, terdapat banyak ketidakpastian berupa probabilitas-probabilitas terkait dengan urutan bangunan-bangunan dalam menghubungkan PLTS atapnya ke jaringan distribusi tenaga listrik. Probabilitas-probabilitas tersebut menyebabkan terjadinya pola acak natural dari distribusi PLTS atap pada sepanjang saluran sistem distribusi tegangan rendah [12]. Karakteristik ketidakpastian juga terdapat pada produksi daya keluaran PLTS dan permintaan beban. Jika diamati dalam

kerangka acuan runtun waktu, ketidakpastian ini menyebabkan fluktuasi yang bervariasi secara tidak tentu pada daya keluaran PLTS dan permintaan beban [13, 15].

Pengembangan-pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS telah dilakukan untuk menjawab tantangan dalam mendapatkan hasil yang representatif. Periode awal dalam proses pengembangan tersebut adalah penentuan kapasitas *hosting* dengan metode berbasis *deterministic* [16–22]. Metode berbasis *deterministic* digunakan untuk melakukan estimasi kapasitas *hosting* PLTS karena akurasi yang tinggi [19, 22]. Pada metode ini, kapasitas *hosting* dicari dengan menetapkan nilai-nilai tertentu sebagai variabel-variabel simulasi. Metode ini tidak memperhitungkan karakteristik acak dari penetrasi sehingga ukuran daya PLTS dan lokasi integrasinya ditentukan secara *deterministic*. Artinya, metode berbasis *deterministic* tidak memasukkan ketidakpastian-ketidakpastian ukuran daya PLTS dan lokasi integrasi PLTS [16, 18]. Proses distribusi PLTS pada metode ini dilakukan dengan menetapkan ukuran daya PLTS dengan suatu nilai tertentu dan lokasi integrasi PLTS pada satu atau beberapa *bus* dalam sistem-sistem distribusi yang digunakan.

Untuk mempercepat proses komputasi, metode penentuan kapasitas *hosting* berbasis *deterministic* dapat dinyatakan dalam sebuah *rule of thumb* [17]. Dalam hal ini, permintaan-permintaan beban juga dapat dinyatakan dalam nilai-nilai persentase yang telah ditetapkan. Selanjutnya, metode berbasis *deterministic* yang lain dilakukan dengan memodelkan PLTS sebagai model $P-Q$ (daya aktif dan daya reaktif yang konstan) dan $P-V$ (daya aktif dan tegangan yang konstan) [21]. Hal itu dilakukan untuk mempercepat konvergensi dari iterasi simulasinya sehingga waktu komputasi yang cepat dapat diperoleh. Walaupun demikian, akurasi yang tinggi dan waktu komputasi yang singkat pada metode berbasis *deterministic* didapat karena penggunaan sistem distribusi yang disederhanakan [17, 22], padahal mayoritas sistem distribusi tenaga listrik riil mempunyai skema jaringan yang besar. Berkaitan dengan hal tersebut, pada sistem tenaga listrik yang besar, akurasi dari metode *deterministic* akan menurun karena pada sistem yang besar tersebut pendekatan ini membutuhkan beban komputasi yang tinggi [18].

Metode berbasis *deterministic* umumnya digunakan dalam menentukan kapasitas *hosting* pada satu atau beberapa PLTS terdistribusi berukuran daya besar [23, 24]. Walaupun demikian, penggunaan skenario *worst-case* dan pembulatan nilai-nilai yang ekstrim

tetap perlu dilakukan pada metode berbasis *deterministic* tersebut [25]. Hal ini disebabkan karena penetrasi PLTS mempunyai banyak karakteristik-karakteristik ketidakpastian alami seperti yang telah dijelaskan, baik produksi maupun konsumsi. Faktor-faktor ketidakpastian ini semakin tinggi ketika kasus penetrasi PLTS yang dihadapi adalah penetrasi PLTS atap yang jumlahnya banyak dan tersebar secara acak alami. Dengan alasan itu, metode berbasis *deterministic* tidak cukup untuk dipakai pada penentuan dan analisis penetrasi PLTS atap [26].

Periode selanjutnya dalam proses pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap adalah metode berbasis proses simulasi stokastik [27–29]. Proses simulasi stokastik dalam studi penetrasi PLTS atap perlu dipertimbangkan terkait dengan kebergantungan kapasitas PLTS atap terhadap persebaran PLTS atap pada jaringan distribusi [27]. Metode-metode yang dikembangkan pada periode tersebut ditandai dengan memasukkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian sebagai masukan dalam pemodelan penetrasi PLTS atap, kemudian menganalisis atau mengevaluasi dampak pada keluarnya. Dalam hal ini, model Monte Carlo digunakan untuk memformulasikan permasalahan penetrasi PLTS atap secara stokastik [28]. Hal tersebut perlu dilakukan karena kapasitas *hosting* bergantung pada variabel-variabel ketidakpastian seperti lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS [29]. Untuk menambah representasi ketidakpastian, konsumsi daya pelanggan dan daya keluaran PLTS diterapkan sebagai variabel-variabel acak dalam perhitungan kapasitas *hosting* PLTS. Kapasitas *hosting* didapat dari hasil evaluasi indeks performa terhadap batasan operasional jaringan distribusi tenaga listrik yang dilakukan studi. Ketepatan dalam merumuskan indeks performa jaringan berkontribusi besar pada performa metode penentuan kapasitas *hosting*. Karakteristik-karakteristik ketidakpastian tersebut dipertimbangkan untuk menghasilkan model penetrasi PLTS atap yang representatif.

Ketidakpastian lain yang perlu diperhatikan dalam usaha untuk meningkatkan tingkat representatif dari pemodelan penetrasi PLTS atap pada penentuan kapasitas *hosting* stokastik adalah ketidakpastian yang terkait dengan baterai. Dalam hal ini, baterai-baterai yang dipasang pada suatu sistem distribusi tenaga listrik yang telah terintegrasi pada PLTS atap terdistribusi terbukti dapat mengurangi dampak negatif penetrasi PLTS atap terhadap jaringan distribusi tegangan rendah [30–32]. Strategi-strategi manajemen sistem penyimpanan energi dibentuk untuk mengendalikan operasi baterai-baterai

yang dipasang tersebut. Strategi-strategi tersebut diarahkan untuk bisa digunakan baik pada sistem yang terhubung grid maupun yang beroperasi secara *islanded* [32]. Untuk tujuan tersebut, salah satu cara yang dilakukan adalah pendekatan dalam mengkoordinasikan baterai yang terintegrasi pada PLTS atap dari para pelanggan dan kendali penanggungan kenaikan tegangan [30]. Dengan cara ini, diasumsikan bahwa semua pelanggan mempunyai profil beban dan daya keluaran PLTS atap yang sama. Selanjutnya, suatu algoritme kendali terpusat dan kendali lokal dikerjakan. Cara yang lain dilakukan melalui pemodelan baterai yang terintegrasi dengan PLTS atap dalam mengonsumsi kelebihan daya keluaran PLTS atap saat siang hari dan menggunakannya saat terjadi beban puncak pada malam hari. Pengurangan dampak dari perubahan daya keluaran PLTS atap yang mendadak dengan mengimplementasikan *discharge* jangka pendek terbukti dapat diraih melalui penerapan cara ini [31].

Meskipun penelitian tentang strategi-strategi manajemen sistem penyimpanan energi telah dikerjakan, pelibatan kemungkinan-kemungkinan pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan panel PLTS sekaligus dengan baterai (PLTS-baterai) pada sistem distribusi belum diteliti. Penelitian sebelumnya hanya memasukkan baterai-baterai secara terpisah setelah simulasi penetrasi PLTS atap selesai dilakukan. Salah satu urgensi untuk mempertimbangkan PLTS-baterai dalam perhitungan kapasitas *hosting* tersebut adalah semakin meningkatnya jumlah penetrasi PLTS-baterai. Di Jerman tercatat 40% penetrasi yang terjadi adalah penetrasi PLTS-baterai [33]. Maka dari itu, penentuan kapasitas *hosting* dengan mempertimbangkan PLTS-baterai perlu dilakukan.

Model penetrasi PLTS atap yang representatif erat kaitannya dengan akurasi metode. Terlebih lagi, karena metode berbasis stokastik melibatkan banyak proses acak, evaluasi dari akurasi metode diperlukan. Untuk alasan tersebut, penelitian pada [12] menunjukkan bahwa performa akurasi dari estimasi kapasitas *hosting* berbanding lurus dengan jumlah simulasi Monte Carlo yang dilakukan. Melalui penerapan parameter toleransi sebesar 0.05%, penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil estimasi kapasitas *hosting* dengan akurasi diatas 99% mampu dicapai dengan mengerjakan minimal 105 simulasi Monte Carlo. Dengan 50 level penetrasi dan 105 skenario pendistribusian maka total skenarionya adalah 5250. Jumlah skenario yang besar ini masih perlu untuk dikalikan dengan resolusi waktu pengamatan yang diterapkan pada suatu rentang waktu tertentu. Terkait resolusi waktu pengamatan tersebut, penelitian-penelitian penentuan

kapasitas *hosting* PLTS atap pada awalnya difokuskan pada pengamatan suatu rentang waktu yang merepresentasikan beban-beban minimum [34]. Akan tetapi, perkembangan penelitian mengenai kerangka analisis runtun waktu membuat dampak dari penetrasi PLTS atap dalam jumlah besar dapat diamati pada suatu resolusi waktu dalam satu hari, misal per jam [12]. Terkait tujuan agar dapat mengamati dampak penetrasi PLTS atap pada resolusi waktu pengamatan yang lebih tinggi, penelitian pada [35] menunjukkan bahwa resolusi 15 menit dari data penyinaran matahari pada PLTS atap diperlukan untuk mendapatkan persentase kesalahan dibawah 1%. Meskipun demikian, resolusi yang tinggi akan meningkatkan waktu komputasi [35]. Waktu komputasi yang cepat pada penentuan kapasitas *hosting* perlu dicapai karena berkaitan dengan kecepatan operator sistem distribusi tenaga listrik dalam mengambil keputusan untuk setiap permintaan penyambungan PLTS ke jaringan [14,36,37]. Maka dari itu, dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut, pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik perlu dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Pada skala tertentu, penetrasi PLTS atap ke jaringan distribusi tegangan rendah dapat menyebabkan gangguan pada performa operasinya, seperti tegangan lebih, aliran daya balik, pelanggaran kapasitas termal konduktor dan lain-lain. Terkait hal itu, metode penentuan kapasitas *hosting* yang representatif dengan kondisi riil penetrasi PLTS atap diperlukan. Meskipun metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dapat merepresentasikan karakteristik-karakteristik ketidakpastian dengan lebih baik dibandingkan metode berbasis *deterministic*, karakteristik-karakteristik PLTS-baterai belum dipertimbangkan pada penelitian-penelitian sebelumnya. Kenaikan penetrasi PLTS-baterai mendorong urgensi untuk melibatkan PLTS-baterai dalam penghitungan kapasitas *hosting* stokastik.

Sementara itu, karena metode berbasis stokastik melibatkan banyak proses acak, evaluasi dari akurasi metode diperlukan. Berkaitan dengan hal tersebut, performa akurasi dari estimasi kapasitas *hosting* berbanding lurus dengan jumlah simulasi Monte Carlo yang dilakukan. Jumlah simulasi yang banyak diperlukan untuk mendapatkan akurasi yang tinggi, padahal jumlah simulasi yang semakin banyak memberikan beban komputasi yang semakin berat. Pada prakteknya, beban komputasi yang berat dapat berakibat pada lamanya waktu pengambilan keputusan oleh operator distribusi tenaga listrik terhadap setiap permintaan penyambungan PLTS atap ke jaringan distribusi. Dalam

hal ini, keputusan yang cepat dibutuhkan untuk dapat mengatasi jumlah permintaan penyambungan PLTS dari konsumen yang semakin meningkat. Maka dari itu, metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik perlu dikembangkan untuk mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian PLTS-baterai, serta untuk meningkatkan akurasi tanpa meningkatkan beban komputasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik pada penetrasi PLTS atap skala besar dengan mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian PLTS-baterai, serta untuk meningkatkan akurasi tanpa menambah beban komputasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat digunakan oleh perencana dan operator sistem distribusi sebagai salah satu pertimbangan untuk menghadapi dampak negatif dari kenaikan yang tinggi dari penetrasi PLTS-baterai ke jaringan distribusi tegangan rendah. Selain itu, untuk peneliti-peneliti dibidang integrasi PLTS-baterai pada jaringan distribusi tegangan rendah, penelitian ini dapat dijadikan sebagai sumber acuan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Bagian ini menyediakan temuan dan kontribusi dari penelitian-penelitian sebelumnya yang meneliti mengenai pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik pada penetrasi PLTS atap skala besar. Hal itu disediakan untuk memperlihatkan posisi penelitian-penelitian yang sudah terbit dalam rangka menyelesaikan permasalahan yang dipaparkan pada bab sebelumnya. Sementara itu, posisi penelitian disertasi ini terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, keaslian penelitian, dan kontribusi dari penelitian disertasi ini juga disediakan pada bagian ini.

2.1.1 Kerangka Analisis Probabilistik untuk Ketidakpastian Masukan

Analisis probalistik merupakan analisis yang masukannya berupa variabel-variabel acak yang mempunyai *probability density function* (PDF) [38]. Tantangan paling besar dalam suatu analisis probabilistik adalah penghitungan dampak dari variabel-variabel masukan yang bersifat acak terhadap variabel keluaran yang diamati. Pada kasus kapasitas *hosting*, variabel-variabel masukannya adalah ketidakpastian-ketidakpastian penetrasi PLTS atap, sedangkan variabel keluarannya adalah kapasitas *hosting* yang direpresentasikan oleh level penetrasi PLTS atap terhadap indeks-indeks performa operasi sistem distribusi tenaga listrik. Penghitungan dampak masukan terhadap keluaran tersebut menentukan kualitas analisis probabilistik dari kapasitas *hosting*.

Untuk mendapatkan hasil analisis probabilistik yang diinginkan, proses memodelkan variabel-variabel ketidakpastian masukan memegang peranan yang penting [39]. Untuk alasan tersebut, distribusi-distribusi probabilitas masukan digunakan sebagai bentuk dari pemodelan variabel ketidakpastian masukan tersebut. Dalam hal ini, pemilihan jenis distribusi-distribusi probabilitas tersebut dilakukan berdasarkan karakteristik-karakteristik dari variabel-variabel ketidakpastian dan skenario yang digunakan. Berkaitan dengan hal tersebut, distribusi-distribusi probabilitas masukan untuk penetrasi PLTS atap ditunjukkan pada Tabel 2.1. Dari tabel tersebut tampak bahwa

Tabel 2.1. Perbandingan Distribusi Probabilitas Masukan Penetrasi PLTS Atap

Karakteristik	Model Distribusi Penelitian Sebelumnya	Pemodelan Distribusi pada Penelitian Disertasi Ini
Lokasi integrasi PLTS atap	Distribusi uniform [40, 41], Distribusi normal [12, 14, 42]	Distribusi normal
Ukuran daya PLTS atap	Distribusi uniform [41], Distribusi normal [12, 40, 42]	Distribusi normal
Daya keluaran PLTS atap	Dihitung dari data historis iradiasi matahari [12, 42, 43], autoregressive moving average (ARMA) [44]	Dihitung dari data historis iradiasi matahari
Permintaan beban	Dirancang dari data historis permintaan beban [12, 14, 42]	Dirancang dari data historis permintaan beban
Ukuran dan lokasi PLTS-baterai	Distribusi normal (PLTS disebar terpisah dengan baterai) [45], <i>Deterministic</i> [46, 47]	Distribusi normal (PLTS disebar terintegrasi dengan baterai)

berbagai model distribusi probabilitas masukan dapat digunakan untuk merepresentasikan lokasi PLTS, ukuran daya PLTS, daya keluaran PLTS, permintaan beban, dan inverter PLTS. Lokasi PLTS pada jaringan distribusi dan ukuran daya PLTS yang dihubungkan ke jaringan digolongkan sebagai variabel ketidakpastian karena sifatnya yang acak alami [12, 14, 40–42]. Ukuran daya PLTS yang dipasang oleh setiap pelanggan ditentukan oleh pelanggan sendiri sehingga sistem distribusi melihatnya sebagai karakteristik yang acak dan tidak pasti besarnya [12, 40–42]. Selanjutnya, daya keluaran PLTS, baik daya aktif maupun daya reaktif mempunyai karakteristik ketidakpastian [12, 42–44]. Daya keluaran PLTS ini dapat dihitung dari iradiasi matahari yang juga bersifat tidak pasti. Iradiasi matahari mempunyai sifat ketidakpastian karena variasi dari pergerakan awan, cuaca, iklim, dan ketidaktepatan pengukuran. Selain dari sistem PLTS-nya, ketidakpastian juga terdapat pada sistem distribusi tenaga listrik, yaitu permintaan beban [12, 14, 42]. Permintaan beban ini berfluktuasi dan bervariasi sepanjang waktu setiap harinya. Untuk karakteristik ukuran dan lokasi PLTS-baterai, peneliti pada [45] menggunakan distribusi normal untuk mendistribusikan PLTS atap dan baterai. Meskipun demikian, PLTS atap didistribusikan terpisah dengan baterai. Artinya, baterai difungsikan untuk pencegahan gangguan, bukan kriteria karakteristik yang melekat dengan PLTS atap dalam penentuan kapasitas *hosting*.

Dengan kata lain, penentuan kapasitas *hosting* hanya melibatkan karakteristik ketidakpastian dari PLTS atap, sedangkan baterai didistribusikan setelah kapasitas *hosting* dihitung. Sementara itu, peneliti pada [46,47] menggunakan pendekatan *deterministic* dalam penentuan ukuran dan lokasi PLTS-baterai sehingga penelitian-penelitian tersebut tidak membuat model distribusi peubah-peubah acak.

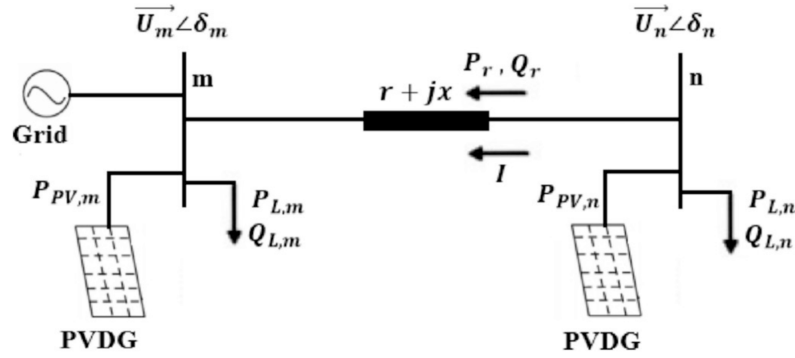
Pada penelitian disertasi ini, karakteristik PLTS-baterai ditetapkan sebagai masukan. Seperti PLTS tanpa baterai, PLTS-baterai juga dimodelkan dengan ketidakpastian ukuran daya dan lokasi integrasi. Dalam hal ini, distribusi normal digunakan untuk membuat pemodelan distribusi dari ukuran dan lokasi PLTS-baterai tersebut. Berbeda dengan penelitian sebelumnya [45], penelitian disertasi ini memperhitungkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai dalam penentuan kapasitas *hosting*.

2.1.2 Batasan Level Tegangan Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Batasan level tegangan sistem distribusi tegangan rendah adalah salah satu batas operasi yang cukup sering digunakan untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik [6, 12, 14, 29, 34, 42, 44, 48–53]. Dalam menyuplai daya ke pelanggan-pelanggan yang bersifat pasif, jaringan tenaga listrik konvensional mempunyai desain aliran menurun dari sistem pembangkit, sistem transmisi, sampai dengan sistem distribusi. Selanjutnya, fokus dari penyedia layanan daya listrik adalah penurunan tegangan pada penyulang-penyulang. Akan tetapi, kondisi ini berubah ketika terjadi integrasi PLTS atap skala besar pada sistem distribusi. Pelanggan-pelanggan yang awalnya bersifat pasif tersebut berubah menjadi pelanggan-pelanggan yang bersifat aktif, yaitu kaitannya dengan pengaliran daya. Injeksi arus dari pelanggan-pelanggan aktif ini mengubah arah aliran daya konvensional dan profil tegangan pada sistem distribusi. Skenario paling buruk adalah ketika total daya yang dibangkitkan PLTS-PLTS atap tersebut melebihi total kebutuhan beban dan rugi-rugi saluran. Pada kondisi tersebut, aliran daya balik dapat terjadi dan menyebabkan kenaikan tegangan yang melebihi batas-batas yang diijinkan oleh penyulang.

Rangkaian sederhana mengenai penetrasi PLTS atap pada sistem tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1. Berdasarkan gambar tersebut, formula untuk penurunan tegangan yang melalui penghantar dinyatakan sebagai

$$\Delta \vec{U} = \vec{U}_m - \vec{U}_n = I(r + jx) = \Delta \vec{U}_{Re} + \Delta \vec{U}_{Im}. \quad (2-1)$$



Gambar 2.1. Rangkaian sederhana dari PLTS atap yang terhubung pada sistem tenaga listrik.

Dalam hal ini, perbedaan sudut fase antara kedua titik yang berdekatan, titik m dan n , diasumsikan sangat kecil, sehingga bagian imajiner dari penurunan tegangan diabaikan. Dengan mempertimbangkan hubungan antara daya aktif dan reaktif, didapatkan

$$|\Delta \vec{U}| \approx |\Delta \vec{U}_{Re}| = \frac{r \cdot P_r + x \cdot Q_r}{\vec{U}_n}, \quad (2-2)$$

kemudian, turunan dari Persamaan 2-2 terhadap transfer daya dapat dinyatakan sebagai

$$\frac{\delta |\Delta \vec{U}|}{\delta P_r} dP_r + \frac{\delta |\Delta \vec{U}|}{\delta Q_r} dQ_r = \frac{r}{|\Delta \vec{U}|} dP_r + \frac{x}{|\Delta \vec{U}|} dQ_r. \quad (2-3)$$

Dari Persamaan 2-3, dapat dipahami bahwa perbedaan tegangan akan naik ketika daya aktifnya naik. Dengan kata lain, jika daya aktif dari pembangkitan PLTS atap lebih besar daripada permintaan daya aktif pada titik m , tegangan pada titik tersebut akan lebih besar daripada tegangan pada titik n .

Selanjutnya, kenaikan tegangan yang telah dijelaskan tersebut perlu untuk diukur. Pengukuran kenaikan ditujukan untuk menghindari pelanggaran batas tegangan. Batasan-batasan level tegangan pada sistem-sistem tenaga listrik diperlihatkan pada Tabel 2.2. Diperlihatkan pada tabel tersebut bahwa Standar EN 50160 mengatur batas tegangan pada rentang 0.9 pu sampai dengan 1.1 pu dengan rata-rata nilai RMS yang terjadi selama 10 menit [54]. Durasi dalam definisi tersebut dimaksudkan untuk membedakan kenaikan tegangan dengan perubahan cepat pada tegangan atau tegangan *dip*. Selanjutnya, Standar ANSI C84.1 menjelaskan dua jenis rentang dalam mengatur batasan level tegangan, yaitu rentang A dan rentang B [55]. Dalam hal ini, rentang A adalah rentang tegangan optimal,

yaitu 0.95 pu sampai dengan 1.05 pu. Rentang B adalah rentang tegangan yang diterima, tetapi tidak optimal, yaitu 0.91 pu sampai dengan 1.058 pu. Pada IEC 60038, rentang yang diijinkan adalah 0.9 pu sampai dengan 1.1 pu untuk tegangan nominal 230/400 V pada sistem 50 Hz [56]. Meskipun demikian, batasan level tegangan yang tertuang pada *grid code* juga berbeda-beda untuk negara yang berbeda, misalnya -6.1%/ +10.0% di Australia, -8.3%/ +4.2% di Canada, $\pm 10\%$ di Jerman, $\pm 6\%$ di Jepang, $\pm 5.9\%$ di Korea, -6.0%/ +10.0% di U.K., dan ± 5 di U.S. [57].

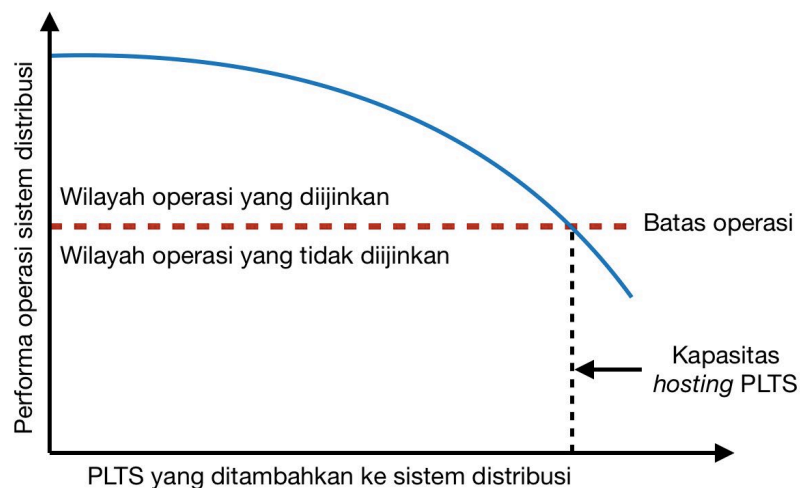
Tabel 2.2. Batasan Level Tegangan pada Berbagai Standar

Standar	Batasan Level Tegangan
EN 50160 (<i>Voltage characteristics of electricity supplied by public systems</i>) [54]	Tegangan rendah: $\pm 10\%$ (0.9 pu sampai dengan 1.1 pu), rata-rata RMS 10 menit
ANSI Standard C84.1 (<i>Electric power systems and equipment—voltage ratings (60 Hz)</i>) [55]	Rentang A: $\pm 5\%$ (0.95 pu sampai dengan 1.05 pu) Rentang B: 91.7% untuk tegangan minimum (0.917 pu) dan 105.8% untuk tegangan maksimum (1.058 pu)
IEC 60038 (<i>Voltage standard</i>) [56]	Tegangan rendah: $\pm 10\%$ untuk tegangan nominal 230/400 V

Pada penelitian disertasi ini, batas operasi tegangan lebih diterapkan sebagai kekangan dalam menentukan kapasitas *hosting* untuk penetrasi PLTS atap skala besar. Untuk batasan level tegangan lebih, penelitian disertasi ini menggunakan Standar ANSI C84.1. Dalam hal ini, rentang tegangan dari 0.95 pu sampai dengan 1.05 pu (rentang A) digunakan sebagai rentang dalam mengevaluasi kenaikan tegangan yang diakibatkan oleh penetrasi PLTS atap skala besar pada jaringan distribusi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan resolusi pengamatan per jam [12, 34], penelitian disertasi ini menggunakan resolusi pengamatan per 15 menit. Karena fluktuasi daya keluaran PLTS atap yang sangat cepat, resolusi yang lebih tinggi ini diterapkan agar dampak-dampak penetrasi PLTS terhadap tegangan lebih pada waktu kurang dari satu jam dapat diamati.

2.1.3 Kapasitas *Hosting* Stokastik

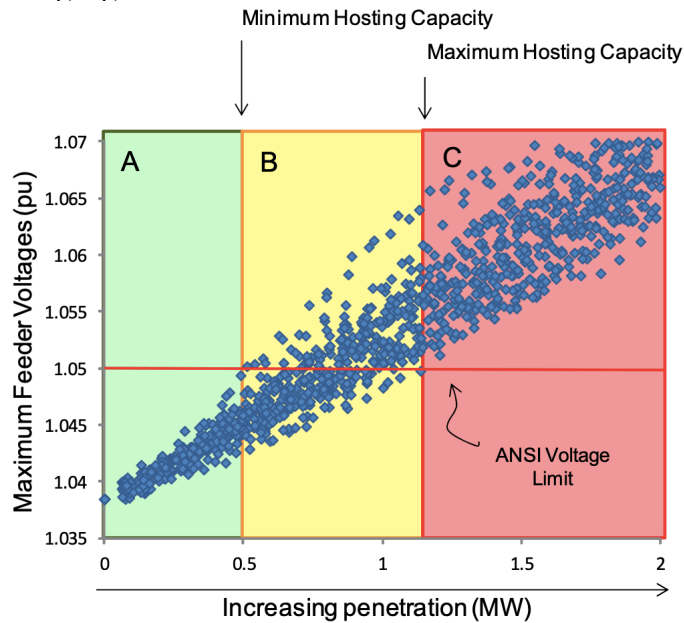
Konsep mengenai kapasitas *hosting* pertama kali dicetuskan tahun 2004. Selanjutnya, pada tahun 2005, M. H. J. Bollen dan M. Häger membatasi dampak kenaikan penetrasi energi baru terbarukan sebagai batasan-batasan teknis terhadap operator sistem tenaga listrik dan pelanggan [58]. Kapasitas *hosting* didefinisikan sebagai penetrasi energi baru terbarukan ketika sistem tenaga listrik beroperasi dengan baik. Penghitungan kapasitas *hosting* didasarkan pada indeks-indeks performa operasi sistem tenaga listrik yang bervariasi sehingga kapasitas *hosting* bukan merupakan satu nilai ukuran yang diwakili dengan satu hasil. Pada tahun 2011, M. H. J. Bollen dan F. Hasan mendefinisikan kapasitas *hosting* sebagai jumlah maksimum dari unit-unit pembangkitan tersebar yang dapat diintegrasikan pada sistem tenaga listrik ketika performa operasi sistem menjadi tidak diijinkan untuk terjadi jika berada diatas jumlah penetrasi ini [10]. Untuk kasus penetrasi PLTS atap, ilustrasi mengenai definisi kapasitas *hosting* tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dalam gambar tersebut ditunjukkan bahwa penetrasi PLTS atap menyebabkan penurunan performa operasi sistem distribusi tegangan rendah, dan kapasitas *hosting* adalah batas maksimal penetrasi sebelum penurunan operasi sistem distribusi tersebut menyentuh batas operasi yang diijinkan.



Gambar 2.2. Konsep kapasitas *hosting* PLTS atap.

Pada [59], Electric Power Research Institute (EPRI) dan Sandia National Laboratories (SNL) menjelaskan bahwa ketidakpastian didalam menentukan kapasitas *hosting* semakin meningkat karena ketidaktahuan mengenai lokasi integrasi PLTS, keberagaman ukuran daya PLTS, ketidakpastian alami dari daya keluaran PLTS karena

perubahan-perubahan cuaca, fluktuasi kebutuhan beban, dan lain-lain. Hal ini menyebabkan perlunya pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik untuk penetrasi PLTS atap [51, 60]. Oleh karena itu, kapasitas *hosting* dihasilkan bukan sebagai satu nilai tunggal. Gambar 2.3 memperlihatkan nilai-nilai kapasitas *hosting* stokastik untuk batas operasi tegangan lebih.



Gambar 2.3. Kapasitas *hosting* stokastik untuk batas operasi tegangan lebih [60].

Pada Gambar 2.3 teramati bahwa, dalam penentuan kapasitas *hosting* stokastik, penetrasi-penetrasi dalam gambar tersebut dapat dibagi menjadi tiga bagian. Bagian A yang berwarna hijau menandakan bahwa performa operasi sistem tenaga listrik dapat diterima untuk semua penetrasi pada area ini. Artinya, tidak terdapat pelanggaran batas operasi tegangan lebih pada bagian A ini. Bagian B yang berwarna kuning menunjukkan bahwa sebagian penetrasi pada area ini tidak menyebabkan pelanggaran batas operasi tegangan lebih, sedangkan sebagian lagi mengalami pelanggaran. Hal ini disebabkan oleh perbedaan lokasi integrasi dan ukuran PLTS atap. Bagian C yang berwarna merah memperlihatkan bahwa semua penetrasi pada area ini menyebabkan terjadinya pelanggaran batas operasi tegangan lebih. Berkaitan dengan area-area tersebut, batas antara bagian A dan bagian B disebut sebagai kapasitas *hosting* minimum, sedangkan batas antara bagian B dan bagian C disebut sebagai kapasitas *hosting* maksimum. Dalam hal ini, kapasitas *hosting* stokastik yang dicari adalah minimum *hosting capacity*, kemudian peningkatan kapasitas *hosting* stokastik berada diantara batas kapasitas *hosting* minimum

dan kapasitas *hosting* maksimum atau bagian B.

Metode-metode untuk penentuan kapasitas *hosting* stokastik yang berdasarkan ketidakpastian-ketidakpastian dari sisi operator sistem distribusi tenaga listrik telah banyak diteliti [12, 14, 29, 42, 52, 53]. Metode stokastik untuk penentuan kapasitas *hosting* yang paling banyak dikembangkan sampai saat ini adalah Monte Carlo. Monte Carlo didefinisikan sebagai algoritme iteratif yang menghasilkan variabel-variabel yang dapat dinyatakan dalam PDF dengan cara mengerjakan proses berulang kali menggunakan sampel variabel-variabel acak yang didapat dari masukan yang juga berupa PDF. Monte Carlo mempunyai akurasi yang tinggi sehingga sering digunakan sebagai *benchmark* untuk teknik-teknik stokastik yang lain. Karena pendekatan Monte Carlo ini membutuhkan jumlah proses pengerjaan yang sangat banyak, beban komputasinya sangat tinggi.

Pendekatan Monte Carlo terdiri atas tiga tipe, *non-sequential Monte Carlo*, *sequential Monte Carlo*, dan *pseudo-sequential Monte Carlo*. *Non-sequential Monte Carlo* adalah metode yang berdasarkan asumsi bahwa sistem dapat direpresentasikan melalui kombinasi keadaan-keadaan dari setiap komponen dari sistem tersebut [61]. Pada tipe ini, variabel-variabel masukan dipilih secara acak untuk setiap iterasi sebagai masukan, kemudian proses iterasinya dikerjakan untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan. Proses iterasinya dihentikan ketika kriteria untuk menghentikan iterasi terpenuhi. Umumnya kriteria untuk menghentikan iterasi tersebut didasarkan pada ukuran statistik berupa rata-rata atau variansi dari variabel-variabel keluarannya. Metode ini tidak berdasarkan kronologi variabel-variabel masukan sehingga mengurangi kompleksitas yang diperlukan dalam mengerjakan metode ini [62]. Metode Monte Carlo yang mempertimbangkan kronologi dalam mengambil sampel variabel-variabel masukan adalah *sequential Monte Carlo* [63]. Pada metode ini, strategi urutan waktu digunakan untuk mengambil sampel-sampel dari variabel-variabel ketidakpastian dari masukan. Meskipun demikian, *sequential Monte Carlo* membutuhkan beban komputasi yang tinggi [64]. Selanjutnya, *pseudo-sequential Monte Carlo* adalah metode hibrida dari *non-sequential Monte Carlo* dan *sequential Monte Carlo* [65]. Pada metode ini, *non-sequential Monte Carlo* diaplikasikan untuk mengambil sampel dari keadaan-keadaan sistem, kemudian *sequential Monte Carlo* digunakan untuk mengerjakan simulasi dengan atribut-atribut tertentu. Oleh karena itu, metode ini lebih cepat dan lebih ringan dari sisi komputasinya dibandingkan dengan *sequential Monte Carlo* [66].

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3, pendekatan *non-sequential* diaplikasikan oleh M. Deakin pada [49, 52, 67]. Penelitian-penelitian tersebut tidak menggu-

Tabel 2.3. Perbandingan Metode Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

Referensi	Metode Stokastik	Mekanisme Runtun Waktu
J. D. Watson (2016) [67]	Monte Carlo	Non-Sequential
A. Arshad (2017) [49]	Monte Carlo	Non-Sequential
A. Dubey (2017) [12]	Monte Carlo	Pseudo-Sequential
F. Ding (2017) [42]	Monte Carlo	Pseudo-Sequential
M. H. Bollen (2017) [29]	Monte Carlo	Pseudo-Sequential
R. Torquato (2018) [14]	Monte Carlo	Pseudo-Sequential
M. Deakin (2019) [52]	Monte Carlo	Non-Sequential
P. P. Vergara (2020) [53]	Monte Carlo	Pseudo-Sequential
Penelitian disertasi ini	Markov Chain Monte Carlo	Pseudo-Sequential

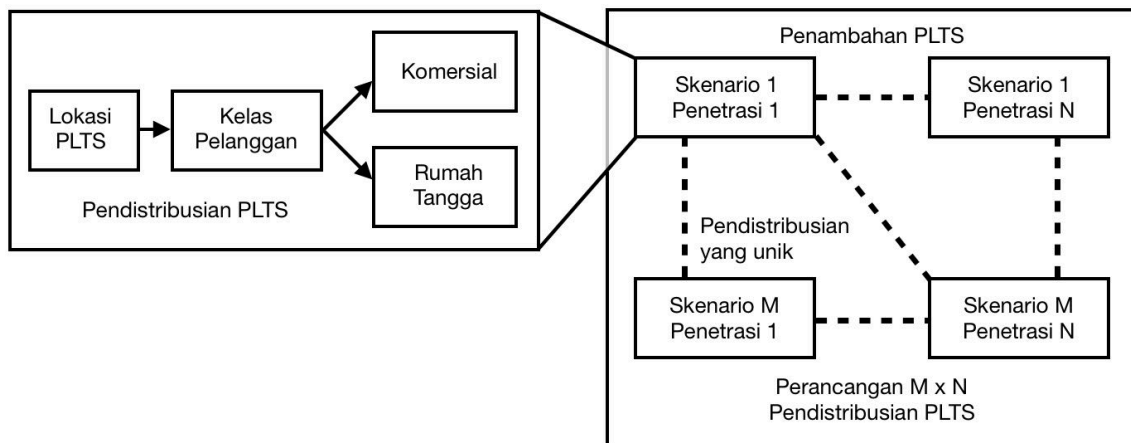
nakan analisis runtun waktu sehingga simulasinya tidak bersifat *chronological*. Penelitian pada [49] menggunakan skenario kondisi terburuk untuk menggantikan kerangka runtun waktu. Sementara itu, untuk penelitian-penelitian pada [52, 67], variabel-variabel ketidakpastian diwakilkan oleh suatu nilai tertentu dalam simulasi-simulasinya. Selanjutnya, penelitian-penelitian pada [12, 14, 29, 42, 53] menggunakan *pseudo-sequential Monte Carlo*. Pada penelitian-penelitian tersebut, pemilihan pelanggan yang memasang PLTS, ukuran daya PLTS, dan lokasi integrasi PLTS pada sistem distribusi dilakukan secara *non-sequential*, sedangkan perhitungan aliran daya dilakukan secara *sequential* pada setiap rentang waktu tertentu.

Pada penelitian disertasi ini, metode penentuan kapasitas *hosting* stokastik dilakukan dengan basis pendekatan Markov Chain Monte Carlo. Pemilihan pendekatan ini dilakukan untuk melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya. Meskipun demikian, penelitian disertasi ini juga menggunakan pendekatan *non-sequential* untuk pemilihan pelanggan yang memasang PLTS, ukuran daya PLTS, dan lokasi integrasi PLTS pada sistem distribusi. Perhitungan aliran daya juga dilakukan secara *sequential* pada setiap rentang waktu tertentu. Perbedaannya terdapat pada cara mengerjakan proses acaknya. Pada pendekatan Markov Chain Monte Carlo yang diusulkan pada penelitian disertasi ini, pengerjaan proses acak dilakukan dengan berdasarkan pada matriks probabilitas transisi

dari proses Markov yang dirancang.

2.1.4 Prosedur Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

Berbagai metode penentuan kapasitas *hosting* untuk penetrasi PLTS atap skala besar telah banyak dikerjakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Dari tahun ke tahun, setiap penelitian dikerjakan untuk mengembangkan metode agar akurasi dapat ditingkatkan. Pada tahun 2012, EPRI merancang skenario penetrasi acak untuk PLTS terdistribusi [51, 68]. Penelitian tersebut membagi kelas pelanggan menjadi dua kategori, yaitu komersial dan rumah tangga. Kategori rumah tangga terdiri atas pelanggan-pelanggan yang melakukan pemasangan PLTS atap sampai 10 kW, sedangkan kategori komersial ditujukan untuk pemasangan PLTS diatas 10 kW. Pada setiap proses pendistribusian PLTS atap dikerjakan skenario yang unik dan berbeda. M skenario penetrasi dirancang dengan N penetrasi untuk setiap skenario sehingga total ada $(M \times N)$ skenario. Ilustrasi menge-



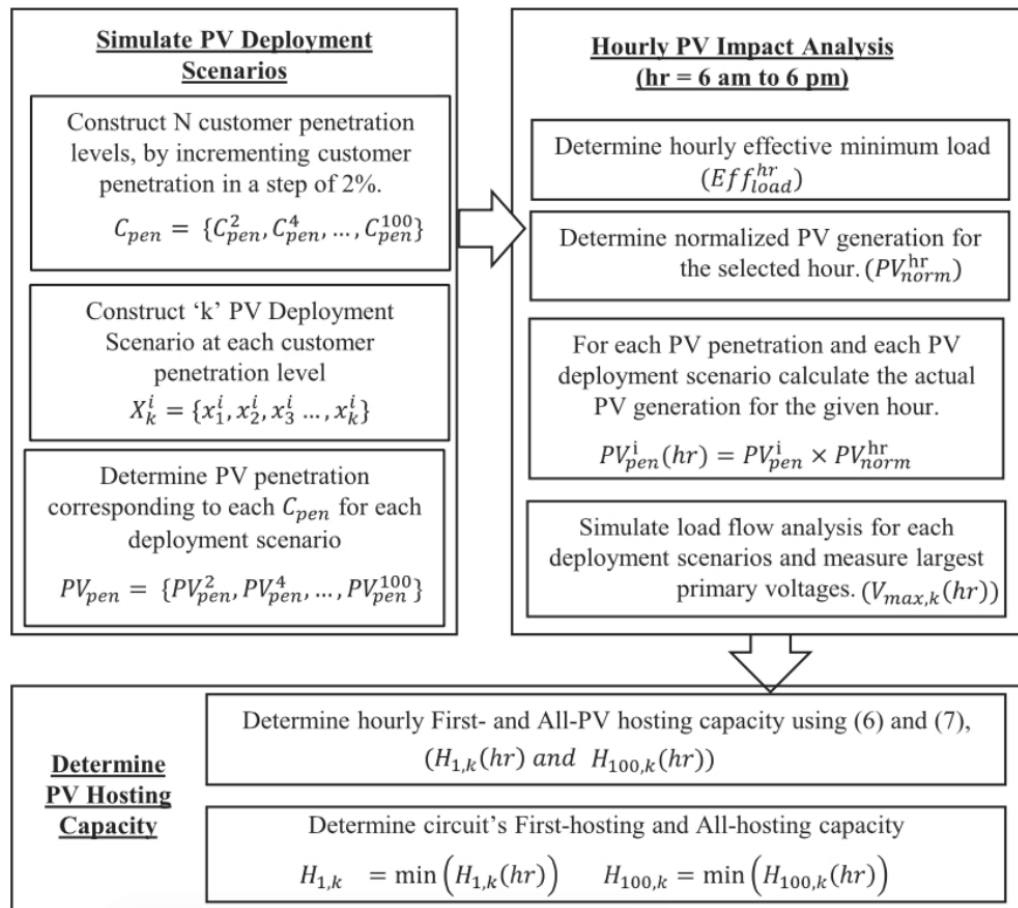
Gambar 2.4. Skenario penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap pada [51].

nai metode tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4 [51]. Perancangan skenario seperti itu dimaksudkan untuk merepresentasikan penetrasi PLTS atap yang mempunyai karakteristik natural yang acak.

Anamika Dubey dkk melakukan investigasi dan analisis mengenai dampak penetrasi PLTS atap pada jaringan distribusi tegangan rendah [34] pada tahun 2015. Penelitian tersebut juga menggunakan perancangan skenario seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Anamika Dubey dkk menunjukkan bahwa dampak penetrasi PLTS bervariasi untuk penetrasi pelanggan yang sama. Hasil tersebut disebabkan oleh perbedaan lokasi integrasi dan ukuran daya PLTS. Penelitian itu juga melakukan studi sensitivitas dan menunjukkan

bahwa penetrasi pada titik terjauh dari penyulang memberikan dampak paling besar terhadap tegangan lebih. Oleh karena itu, nilai kapasitas *hosting* PLTS akan semakin kecil seiring dengan semakin jauhnya lokasi penetrasi PLTS atap terhadap sumber penyulang. Dalam penelitian itu juga ditunjukkan bahwa peningkatan nilai beban minimum akan meningkatkan nilai kapasitas *hosting* PLTS.

Selanjutnya, pada tahun 2017, Anamika Dubey dkk mengembangkan metode penentuan kapasitas PLTS atap skala besar berbasis Monte Carlo dengan menyediakan formula matematika dan kerangka analisis runtun waktu [12]. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap yang diusulkan pada penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5 [12]. Dalam penelitian tersebut, 100 simulasi Monte Carlo dirancang dengan 50

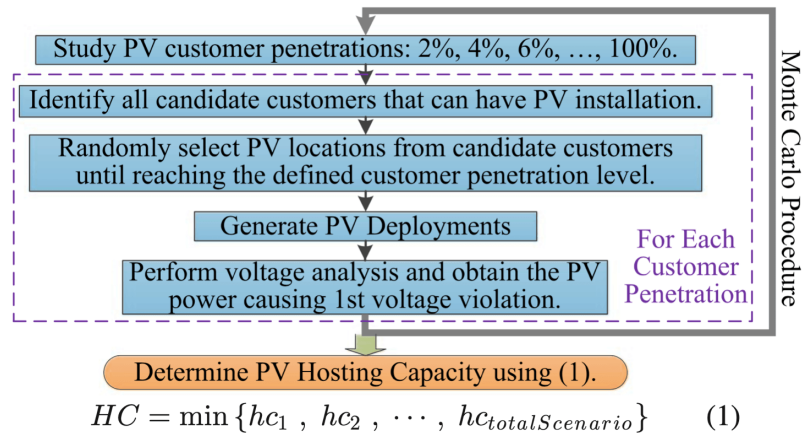


Gambar 2.5. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap pada [12].

level penetrasi pelanggan untuk setiap skenario dan kenaikan sebesar 2% untuk setiap perpindahan level penetrasi. Untuk menentukan kapasitas *hosting* PLTS atap, penelitian tersebut mengusulkan dua formula matematika, yaitu $H_{1,k}$ dan $H_{100,k}$. $H_{1,k}$ adalah kapa-

sitas *hosting* pertama, yaitu minimal terdapat satu skenario dari sejumlah skenario yang mendeteksi adanya pelanggaran batas tegangan lebih. $H_{100,k}$ didefinisikan sebagai penetrasi PLTS terkecil ketika semua skenario yang dikerjakan telah mendeteksi pelanggaran batas tegangan lebih.

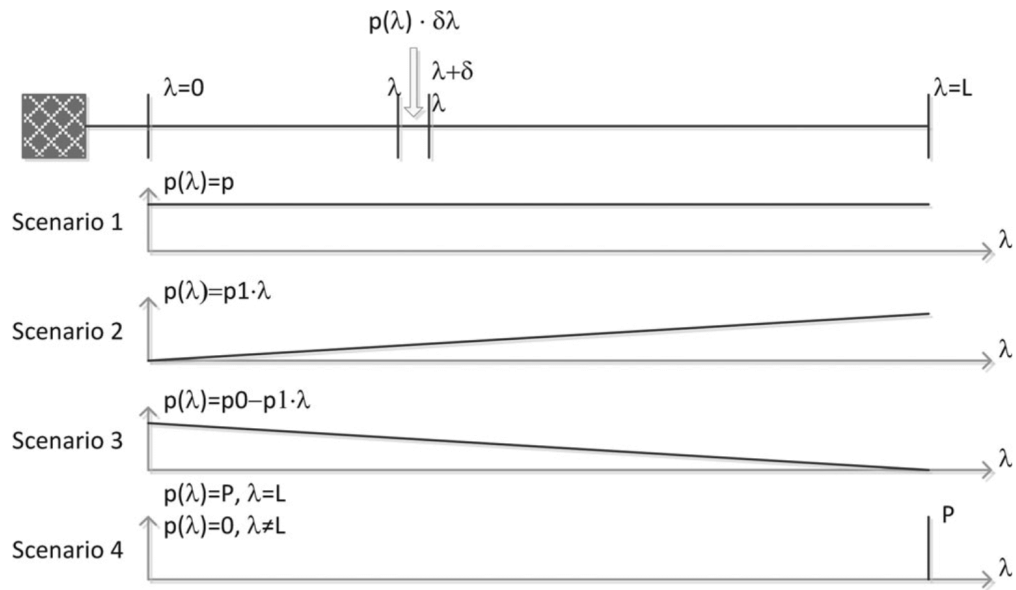
Fei Ding dan Barry Mather [42] juga menggunakan pendekatan pola sebaran seperti pada [12] dengan menerapkan 100 skenario penetrasi dan 50 level penetrasi pelanggan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.6. Rentang waktu pengamatan



Gambar 2.6. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap pada [42].

empat jam dari pukul 10.00 sampai pukul 14.00 digunakan oleh peneliti tersebut. Penelitian tersebut menggunakan 17 penyulang riil sebagai sistem distribusi yang diteliti. Dengan batas operasi tegangan lebih, terdapat 13 penyulang yang mengalami pelanggaran. Hal tersebut mengartikan bahwa terdapat 4 penyulang yang tidak mengalami pelanggaran tegangan lebih walaupun 100% pelanggan telah menyambungkan PLTS ke jaringan distribusi.

B. Bletterie mengerjakan penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dengan empat skenario [69] yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, yaitu pendistribusian PLTS atap secara merata sepanjang penyulang, pendistribusian meningkat dari sumber penyulang ke ujung penyulang, pendistribusian menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang, dan pendistribusian di sekitar ujung penyulang. Hasilnya menunjukkan bahwa skenario pendistribusian menurun dari sumber penyulang ke ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling besar, sedangkan pendistribusian di sekitar ujung penyulang memberikan nilai kapasitas *hosting* paling kecil.

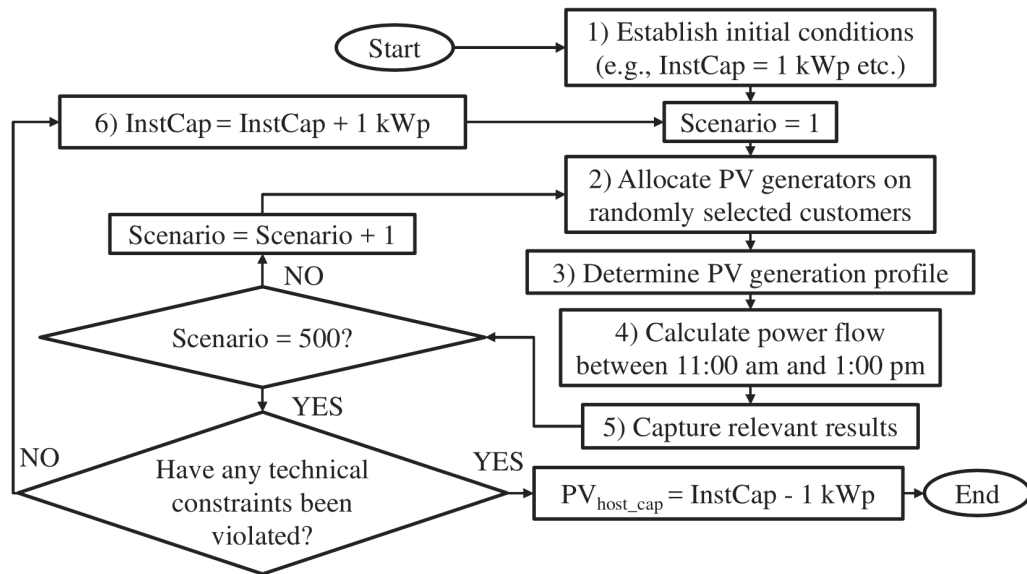


Gambar 2.7. Skenario pendistribusian PLTS atap pada [69].

Bollen dkk [29] mengusulkan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan analisis pada runtun waktu tertentu yang merepresentasikan konsumsi beban-beban minimum. Pada penelitian tersebut, kapasitas *hosting* didapat dari hasil evaluasi indeks performa batasan operasional jaringan distribusi tenaga listrik. Penelitian tersebut menggunakan batasan operasional berupa arus lebih, variasi nilai tegangan yang cepat, ketidakseimbangan tegangan, *harmonics*, dan *supraharmonics*.

Ricardo Torquato dkk melakukan penelitian mengenai penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dilakukan dengan pendekatan level penetrasi [14]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, metode yang diusulkan pada penelitian tersebut dilakukan dengan variasi level penetrasi pelanggan dari 20% sampai 100% dengan besar kenaikan 20%. Proses penetrasi PLTS atap dilakukan secara acak dan berulang dengan kenaikan ukuran daya PLTS sebesar 1 kW untuk setiap level penetrasi pelanggan. 500 skenario penempatan lokasi dikerjakan pada setiap level penambahan ukuran daya PLTS atap dengan rentang waktu pengamatan dua jam dari pukul 11.00 sampai 13.00, serta jeda waktu pengamatan 15 menit. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas *hosting* PLTS atap dapat diamati dari persentase level penetrasi pelanggan. Semakin besar level penetrasi pelanggan maka kapasitas *hosting* PLTS atap semakin besar dan persentase terjadinya pelanggaran tegangan lebih juga semakin besar.

Matthew Deakin dkk mengusulkan cara untuk mempersingkat waktu dan beban

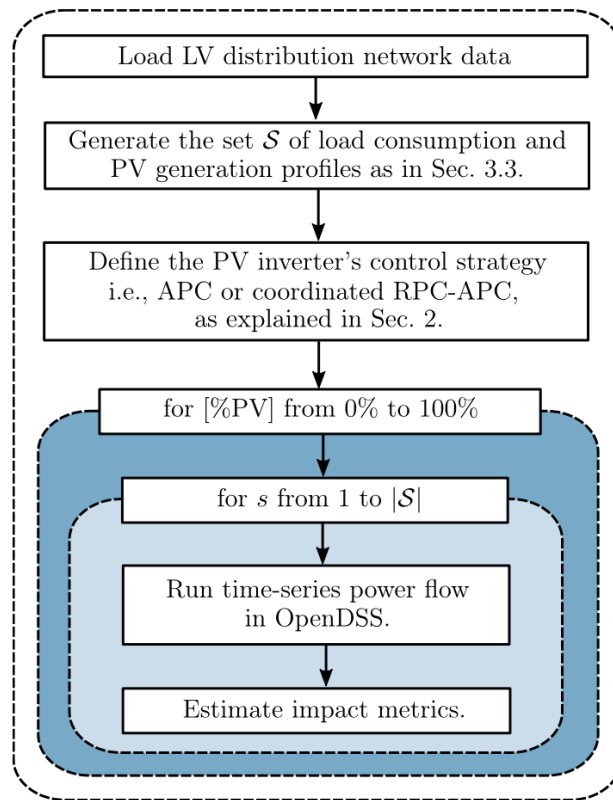


Gambar 2.8. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap pada [14].

komputasi dari metode stokastik Monte Carlo dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Untuk tujuan tersebut, kapasitas *hosting* PLTS ditentukan dengan menggunakan pendekatan *fixed-power* dan *fixed-voltage*. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan *fixed-voltage* lebih efisien dan membutuhkan waktu komputasi lebih cepat. Dalam hal ini, dapat dipahami jika peneliti tersebut menggunakan pembatasan proses penetrasi pada pendekatan *fixed-voltage* sehingga tidak semua kemungkinan diamati. Penelitian tersebut menggunakan 1000 simulasi Monte Carlo.

Penentuan kapasitas *hosting* PLTS yang diusulkan oleh Pedro P. Vergara dkk [53] menggunakan data profil beban dan daya keluaran PLTS dari data yang didapat oleh peneliti. Ilustrasi metode yang diusulkan, ditunjukkan pada Gambar 2.9 [53]. Penentuan lokasi integrasi PLTS dilakukan secara acak sampai semua pelanggan memasang PLTS. Setiap proses penetrasi, aliran daya yang berbasis runtun waktu dikerjakan. Kapasitas *hosting* ditentukan berdasarkan pelanggaran terhadap batas operasi. Batas-batas operasi ini direpresentasikan dalam nilai tegangan dan indeks pembebanan.

Perbandingan prosedur penentuan kapasitas *hosting* stokastik diperlihatkan pada Tabel 2.4. Pada tabel tersebut, terdapat lima kriteria yang diamati, yaitu pemilihan acak untuk lokasi integrasi PLTS atap, pemilihan acak untuk ukuran daya PLTS atap, pertimbangan PLTS-baterai dalam model, kendali proses penetrasi, dan analisis runtun waktu. Teramati bahwa semua penelitian sebelumnya mengacak lokasi integrasi PLTS



Gambar 2.9. Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atop pada [53].

Tabel 2.4. Perbandingan Prosedur Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

Referensi	Lokasi PLTS Acak	Ukuran Daya PLTS Acak	PLTS-Baterai	Kendali Proses Penetrasi	Analisis Runtun Waktu
EPRI (2012) [51]	Ya	Ya	-	-	Ya
A. Dubey (2015) [34]	Ya	Ya	-	-	Ya
A. Dubey (2017) [12]	Ya	Ya	-	-	Ya
F. Ding (2017) [42]	Ya	Ya	-	-	Ya
M. H. Bollen (2017) [29]	Ya	-	-	-	Ya
R. Torquato (2018) [14]	Ya	-	-	-	Ya
M. Deakin (2019) [52]	Ya	-	-	Ya	-
P. P. Vergara (2020) [53]	Ya	-	-	-	Ya
Penelitian disertasi ini	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya

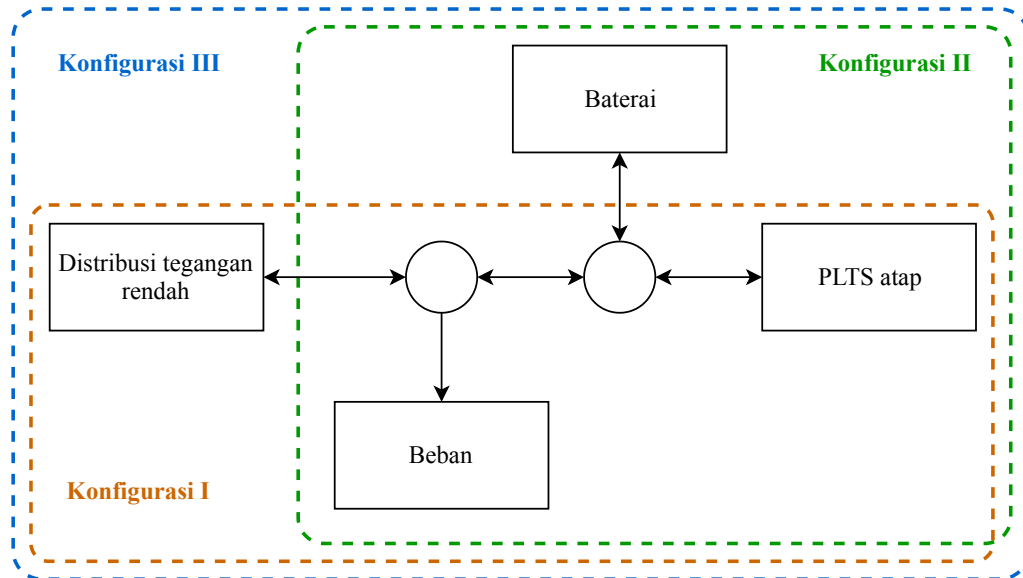
atap pada jaringan distribusi [12, 14, 29, 34, 42, 51–53]. Selanjutnya, peneliti-peneliti pada [12, 34, 42, 51] mengambil sampel acak ukuran daya PLTS dari data historis yang dibentuk dalam PDF. Sementara itu, peneliti-peneliti pada [14, 29, 52, 53] menggunakan suatu angka tertentu sebagai ukuran daya PLTS atap. Untuk PLTS-baterai, belum ada penelitian sebelumnya yang mempertimbangkan PLTS yang terintegrasi dengan baterai untuk dijadikan kandidat untuk dihubungkan ke jaringan distribusi tegangan rendah. Berkaitan dengan simulasi Monte Carlo yang digunakan, dari delapan penelitian-penelitian sebelumnya tersebut, hanya M. Deakin yang menggunakan kendali dalam proses penetrasi PLTS atap [52]. Sebaliknya, hanya M. Deakin yang tidak menggunakan analisis runtun waktu [52].

Pada penelitian disertasi ini, pelanggan dipilih secara acak menggunakan proses Markov sehingga ukuran daya PLTS atap bervariasi secara acak. Untuk lokasi integrasi PLTS atap juga tersebar secara acak karena mengikuti lokasi dari pelanggan yang telah dipilih acak. Selanjutnya, untuk merepresentasikan pelanggan-pelanggan yang mengintegrasikan PLTS-baterai pada jaringan distribusi tegangan rendah, penelitian disertasi ini mempertimbangkan karakteristik-karakteristik ketidakpastian PLTS-baterai seperti yang sudah dideskripsikan sebelumnya. Terkait metodenya, matriks probabilitas transisi pada proses markov menjadi kendali dalam melakukan proses penetrasi PLTS atap pada jaringan distribusi. Dari sisi analisisnya, kerangka analisis runtun waktu digunakan dalam penelitian disertasi ini untuk menganalisis dampak penetrasi pada setiap rentang waktu tertentu.

2.1.5 Konfigurasi dan Kendali Sistem Baterai pada Penetrasi PLTS-Baterai

Pada awalnya terdapat dua konfigurasi dari instalasi PLTS atap. Konfigurasi pertama adalah instalasi PLTS atap tanpa baterai yang terhubung pada sistem distribusi tenaga listrik, sedangkan konfigurasi kedua adalah instalasi PLTS atap dengan baterai yang tidak terhubung ke sistem distribusi tenaga listrik. Dalam hal ini, PLTS atap yang terhubung ke sistem distribusi tersebut dapat berpotensi menurunkan performa operasi sistem distribusi tersebut. Sebaliknya, keberadaan PLTS atap yang tidak terhubung ke sistem distribusi tidak mengganggu performa sistem distribusi tersebut. Meskipun begitu, penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa PLTS-PLTS atap yang diintegrasikan pada jaringan distribusi tegangan rendah semakin meningkat [1,2]. Kondisi

ini menunjukkan bahwa terdapat kebutuhan mengenai keberadaan baterai pada sisi pelanggan [70, 71]. Selanjutnya, kebutuhan tersebut mendorong terciptanya konfigurasi instalasi PLTS atap yang ketiga, yaitu instalasi PLTS-baterai yang terhubung pada sistem distribusi tenaga listrik. Ketiga konfigurasi tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Konfigurasi-konfigurasi instalasi PLTS atap oleh pelanggan.

Bo Lu dan M. Shahidehpour membagi operasi PLTS-baterai menjadi tiga kondisi [72]. Kondisi pertama adalah kondisi pengisian baterai. Ketika permintaan beban sedang turun, maka PLTS atap dan atau sistem distribusi akan melakukan pengisian baterai. Kondisi kedua adalah kondisi diam baterai. Pada kondisi ini, PLTS atap menyuplai beban secara langsung pada durasi waktu tertentu ketika daya keluaran PLTS tinggi dan permintaan beban tinggi. Kondisi ketiga adalah kondisi pengosongan baterai. Baik PLTS atap maupun baterai menyuplai beban puncak pada durasi waktu tertentu saat siang hari. Selanjutnya, baterai menyuplai beban puncak pada malam hari ketika tidak ada daya keluaran PLTS. Ketiga kondisi tersebut terjadi ketika cuaca mendukung PV dalam mendapatkan iradiasi matahari yang cukup untuk membangkitkan daya listrik. Pada saat mendung, hanya baterai yang akan bekerja pada sistem PLTS-baterai karena tidak ada daya yang dibangkitkan oleh PLTS atap.

N. Jayasekara dkk mengembangkan strategi integrasi sistem baterai yang optimal pada jaringan distribusi untuk meningkatkan kapasitas *hosting* [73]. Terkait peningkatan kapasitas *hosting*, penelitian itu mempertimbangkan dua hal, yaitu biaya sistem

distribusi, serta biaya siklus baterai. Selanjutnya, sistem baterai pada penelitian tersebut dianalisis dari sisi aturan tegangan, pengurangan rugi-rugi daya, dan *peak shaving*. Hasilnya memperlihatkan bahwa metode yang diusulkan dapat menginvestigasi *peak shaving*, aturan tegangan, dan pengurangan rugi-rugi daya untuk meningkatkan efisiensi sistem.

S. Hashemi dan J. Østergaard mengusulkan suatu kendali efisien sistem baterai untuk meningkatkan kapasitas *hosting* PLTS [46]. Tujuan dari kendali tersebut adalah untuk mencegah tegangan lebih pada kondisi PLTS atap yang tinggi pada jaringan distribusi. Penelitian tersebut mengusulkan metode untuk menentukan titik-titik operasi dinamis dari sistem baterai. Melalui metode tersebut, dampak dari penyerapan daya reaktif oleh inverter PLTS dimodelkan seperti konsumsi beban. Untuk menghitung kapasitas *hosting* PLTS, sebuah penyulang dengan 52 pelanggan dan 23 bus digunakan dalam simulasi. Simulasi menggunakan 50, 75, dan 100% penetrasi PLTS. Dalam hal ini, ukuran daya PLTS yang dipasang oleh semua pelanggan menggunakan satu nilai tetap yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem baterai 5 kWh dapat menghasilkan kenaikan kapasitas *hosting* sebesar 75%.

P. H. Divshali dan L. Söder merancang metode peningkatan kapasitas *hosting* dengan cara mengoptimalkan pemilihan baterai dan konverter menggunakan kendali kuadratik dari sistem baterai terpusat [74]. Sistem baterai terpusat tersebut dapat mengurangi arus balik dan mengatur tegangan dengan menyerap kelebihan daya ketika produksi daya keluaran PLTS lebih tinggi dari permintaan-permintaan beban. Sistem baterai tersebut juga dapat mengendalikan daya reaktif. Dalam penelitian tersebut, kapasitas *hosting* ditentukan dengan batas operasi arus dan tegangan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan dapat mengendalikan dan memperbaiki profil tegangan.

Mohammed Al-Saffar dkk mengembangkan metode untuk kendali antar sistem baterai pada PLTS terdistribusi [45]. Untuk tujuan tersebut, penetrasi PLTS terdistribusi skala besar dilakukan dalam penelitian tersebut. Penelitian tersebut mengerjakan 100 skenario acak yang terdiri dari lokasi integrasi dan ukuran PLTS. Prosedur tersebut diulangi untuk setiap kenaikan level presentasi 10%. Proses dihentikan ketika 100% level penetrasi sudah tercapai. Untuk kendali baterainya, penelitian tersebut menggunakan *state of charge control (CSOCC)*, yaitu kombinasi dari *Monte-Carlo tree search based reinforcement learning (MCTS-RL)* dan kendali SOC menggunakan *Method Predi-*

ctive Control (MPC). Dalam hal ini, baterai-baterai tersebut dikendalikan untuk mengurangi tegangan lebih pada suatu daerah menggunakan *MCTS-RL* berdasarkan kapasitas masing-masing baterai. Hasilnya, metode yang diusulkan pada penelitian tersebut dapat mengurangi dampak negatif tegangan lebih.

Pada penelitian disertasi ini, PLTS atap didistribusikan secara stokastik sebagai proses acak. Selanjutnya, berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya [45, 46, 73, 74], penelitian disertasi ini mempertimbangkan pelanggan-pelanggan yang memasang PLTS atap yang sudah terintegrasi dengan baterai untuk dipenetrasi ke jaringan distribusi. Metode yang digunakan dalam pengendaliannya adalah metode optimasi untuk meminimalkan siklus baterai dan memaksimalkan kapasitas *hosting*. Perbandingan konfigurasi dan kendali sistem PLTS-baterai dari penelitian-penelitian sebelumnya [45, 46, 73, 74] dan penelitian disertasi ini ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Perbandingan Konfigurasi dan Kendali Sistem PLTS-Baterai

Referensi	Konfigurasi PLTS Atap	Konfigurasi PLTS- Baterai	Metode Kendali PLTS- Baterai
N. Jayasekara (2016) [73]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai terpusat.	Optimasi untuk meminimalkan biaya distribusi dan siklus baterai.
S. Hashemi (2018) [46]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai tersebar.	Pengendalian terpusat.
P. H. Divshali (2019) [74]	Tersebar secara <i>deterministic</i> .	Terpisah. Baterai terpusat.	Kendali kuadratik.
M. Al-Saffar (2020) [45]	Tersebar secara stokastik.	Terpisah. Baterai tersebar.	<i>Reinforcement learning</i> .
Penelitian disertasi ini	Tersebar secara stokastik.	Terintegrasi. PLTS-baterai tersebar.	Optimasi meminimalkan siklus baterai dan memaksimalkan kapasitas <i>hosting</i> .

2.2 Landasan Teori

Pada penelitian disertasi ini, pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS, dengan mempertimbangkan baterai terintegrasi, berbasis Markov Chain Monte Carlo diusulkan. Untuk melandasi hal tersebut, beberapa teori yang telah disediakan oleh penelitian-penelitian sebelumnya dipresentasikan.

2.2.1 Kapasitas *Hosting* PLTS Atap pada Penetrasi Skala Besar

Kapasitas *hosting* PLTS atap adalah jumlah maksimum PLTS atap yang dapat dipenetrasi pada sistem distribusi tenaga listrik tanpa pelanggaran batas operasi pada sistem distribusi tersebut. Penentuan kapasitas *hosting* PLTS diperlukan untuk mencegah dampak negatif yang muncul ketika sistem distribusi menghadapi kenaikan penetrasi PLTS atap yang tinggi.

2.2.2 Penentuan Kapasitas *Hosting* Berbasis Monte Carlo

Metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap telah diteliti oleh beberapa peneliti pada beberapa tahun terakhir [12, 14, 42]. Berdasarkan [12], metode ini terdiri atas tiga prosedur, yaitu pendistribusian PLTS atap, analisis dampak PLTS atap per jam, dan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama.

Dalam pendistribusian PLTS atap, skenario-skenario perlu dirancang terlebih dahulu. Skenario-skenario tersebut antara lain level penetrasi pelanggan dan level penetrasi PLTS atap. Level penetrasi pelanggan (C_{pen}^k) adalah jumlah pelanggan yang mempunyai PLTS atap yang terintegrasi ke jaringan distribusi [12]. Level penetrasi pelanggan ke- k mewakili pelanggan dengan PLTS atap sebesar $k\%$. Dengan nilai kenaikan sebesar 2%, sampai 100%. Formula matematikanya adalah

$$C_{pen} = \{C_{pen}^2, C_{pen}^4, \dots, C_{pen}^{100}\}. \quad (2-4)$$

Skenario selanjutnya yang perlu untuk dirancang adalah level penetrasi PLTS atap (PV_{pen}^k). Level penetrasi PLTS atap didefinisikan sebagai total pembangkitan PLTS atap yang terintegrasi ke jaringan distribusi sesuai dengan level penetrasi pelanggan (C_{pen}^k) ke- k [12]. Hal ini didefinisikan sebagai

$$PV_{pen} = \{PV_{pen}^2, PV_{pen}^4, \dots, PV_{pen}^{100}\}. \quad (2-5)$$

Dengan mempertimbangkan formula-formula tersebut, pada setiap level penetrasi pelanggan (C_{pen}^k), sejumlah skenario pendistribusian PLTS atap (m) dapat dirancang [12], yaitu

$$X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k, \dots, x_u^k\}. \quad (2-6)$$

Selanjutnya, untuk menjalankan analisis per jam, suatu kerangka analisis perlu untuk dirancang [12]. Dalam hal ini, dua langkah perlu dijalankan. Pertama adalah penentuan beban minimum efektif (Eff_{load}^{hr}). Kedua adalah penentuan pembangkitan PLTS atap untuk setiap skenario pendistribusian yang dideskripsikan sebagai

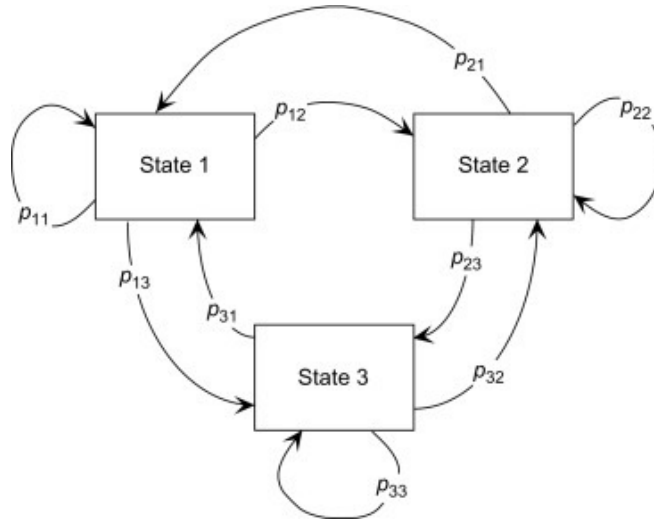
$$PV_{pen}^k(hr) = PV_{pen}^k \times PV_{norm}^{hr} \quad (2-7)$$

Peneliti pada [12] membuat definisi penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama. Kapasitas *hosting* PLTS pertama adalah kapasitas *hosting* PLTS ketika terdapat satu pelanggaran batas operasi [12]. Dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama tersebut, sebelumnya perlu dilakukan analisis aliran daya. Analisis aliran daya ini digunakan sebagai acuan penentuan kapasitas *hosting* PLTS pertama dengan mempertimbangkan tegangan lebih sebagai batas operasi. Selanjutnya kapasitas *hosting* PLTS pertama ($H_{1,m}$) dihitung dengan [12]

$$H_{1,m} = \min_{i \in S} \left\{ PV_{pen}^k \mid P(V_{max,m}^k(hr) > 1.05) \geq \frac{1}{m} \right\} \quad (2-8)$$

2.2.3 Konsep Markov Chain Monte Carlo

Terdapat dua jenis pendekatan Markov Chain Monte Carlo, yaitu *continuous-time* dan *discrete-time*. Dalam hal ini, Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *continuous-time* mempunyai kemungkinan keluaran yang bersifat kontinyu, sedangkan Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *discrete-time* mempunyai kemungkinan keluaran yang tertentu atau dapat diukur. Selanjutnya, jika himpunan dari Markov Chain Monte Carlo dengan karakteristik *discrete-time* mempunyai batas nilai, maka Markov Chain Monte Carlo tersebut mempunyai sifat *finite*. Sebagai gambaran sederhana sebelum masuk ke definisi Markov Chain Monte Carlo, prosedur perubahan keadaan pada Markov Chain Monte Carlo ditunjukkan pada Gambar 2.11. Teramati dalam gambar tersebut bahwa pada Markov Chain Monte Carlo, perubahan keadaan dilakukan berdasarkan suatu nilai probabilitas yang spesifik. Nilai-nilai probabilitas ini yang mengarahkan transisi dari suatu keadaan ke keadaan yang lain.



Gambar 2.11. Blok diagram Markov Chain Monte Carlo.

2.2.3.1 Proses Markov

Dalam proses *Markov*, untuk semua nilai q , nilai saat ini bergantung pada keluaran nilai sebelumnya [75]. Definisi proses *Markov* dilakukan dengan mengasumsikan bahwa $\{f_k \mid k \in [1, 2, \dots, w]\}$ adalah himpunan dari fungsi-fungsi keluaran dari sebuah proses stokastik, s_j adalah nilai dari f_k jika keluaran pada proses stokastik ke- k adalah s_j , and s_i adalah nilai dari f_{k-1} jika keluaran pada proses stokastik ke- $(k-1)$ adalah s_i . Selanjutnya, proses *Markov* didefinisikan sebagai

$$Pr[f_k = s_j \mid (f_{k-1} = s_i) \wedge q] = Pr[f_k = s_j \mid f_{k-1} = s_i] \quad (2-9)$$

2.2.3.2 Probabilitas Transisi Dari Proses Markov

Probabilitas transisi dari proses *Markov* adalah probabilitas dari suatu *state* jika sudah ada *state* sebelumnya [75]. Probabilitas transisi ke- n dari proses *Markov* $p_{ij}(n)$ adalah

$$p_{ij}(n) = Pr[f_n = s_j \mid f_{n-1} = s_i] \quad (2-10)$$

2.2.3.3 Markov Chain Monte Carlo

Dengan mengasumsikan bahwa \mathbf{P} adalah matriks dengan anggota-anggota p_{ij} , maka Markov Chain Monte Carlo didefinisikan sebagai proses *Markov* yang mempunyai matriks transisi \mathbf{P} [75].

2.2.4 Jumlah Proses Acak

Penentuan jumlah proses acak, yaitu metode *multistage non-finite population* (MNP), dipersentasikan oleh peneliti pada [76]. Dengan Z sebagai variabel acak normal, α sebagai level signifikan, σ sebagai standar deviasi, dan E sebagai ukuran presisi yang diinginkan, jumlah sampel proses acak u dihitung melalui

$$u = \sqrt{\frac{\frac{u_3}{0.01} - \frac{u_3}{0.99}}{2}}, \quad (2-11)$$

dengan u_3 adalah nilai perkiraan u pada tahap ketiga yang didefinisikan sebagai

$$u_3 = \sqrt{\frac{u_2 - u_1}{2}}, \quad (2-12)$$

adan u_1 serta u_2 secara berurutan adalah perkiraan u pada tahap pertama dan kedua yang dideskripsikan sebagai

$$u_1 = \frac{Z_{(1-\alpha)}\sigma}{E} \text{ dan } u_2 = \frac{Z_{(1-\alpha)}^2\sigma^2}{E^2}. \quad (2-13)$$

2.2.5 Kerangka Analisis Runtun Waktu

Kerangka analisis runtun waktu diklasifikasikan menjadi dua jenis runtun waktu, yaitu runtun waktu nilai tunggal dan runtun waktu interval. Kerangka analisis runtun waktu nilai tunggal merupakan kerangka analisis runtun waktu yang mempunyai satu nilai untuk setiap titik waktunya. Sementara itu, kerangka analisis runtun waktu interval mempunyai lebih dari satu nilai untuk setiap titik waktunya. Hal ini membuat runtun waktu jenis ini mampu menyajikan interval data untuk setiap titik datanya.

Perbedaan antara kerangka analisis runtun waktu nilai tunggal dan runtun waktu interval terletak pada jumlah titik data yang disediakan untuk setiap titik waktu. Pada kerangka analisis runtun waktu interval, titik-titik data umumnya disediakan dalam bentuk sebaran distribusi. Kerangka analisis runtun waktu interval diperkenalkan oleh Javier Arroyo pada [77]. Selanjutnya, lima tahun setelah itu, oleh peneliti yang sama, disediakan contoh aplikasinya yang dipresentasikan pada [78].

2.2.6 Studi Akurasi

Akurasi dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dapat ditentukan dengan cara mencari probabilitas metode untuk merasakan pelanggaran [12]. Hal ini diformulasikan sebagai

$$Acc_k^\epsilon(H_1) = \max_{0 \leq p \leq 100} \left\{ p \mid 0 < Pr(V_{max,k} \mid h_{1,k}^p > 1.05) \leq \epsilon \right\} \quad (2-14)$$

Selanjutnya, agar resiko penetrasi PLTS atap skala besar dapat diukur, penghitungan resiko pelanggaran (RV) perlu dilakukan [14]. Hal ini dapat digunakan oleh perencana sistem distribusi dan pengatur regulasi untuk menentukan langkah-langkah strategis dalam menghadapi dampak penetrasi PLTS skala besar dan mencegah pelanggaran batas operasi yang terjadi. Untuk menghitung resiko pelanggaran (RV) tersebut, digunakan persentasi sistem distribusi tanpa pelanggaran (SV). Formula matematika yang digunakan adalah

$$RV (\%) = 100 - SV (\%) \quad (2-15)$$

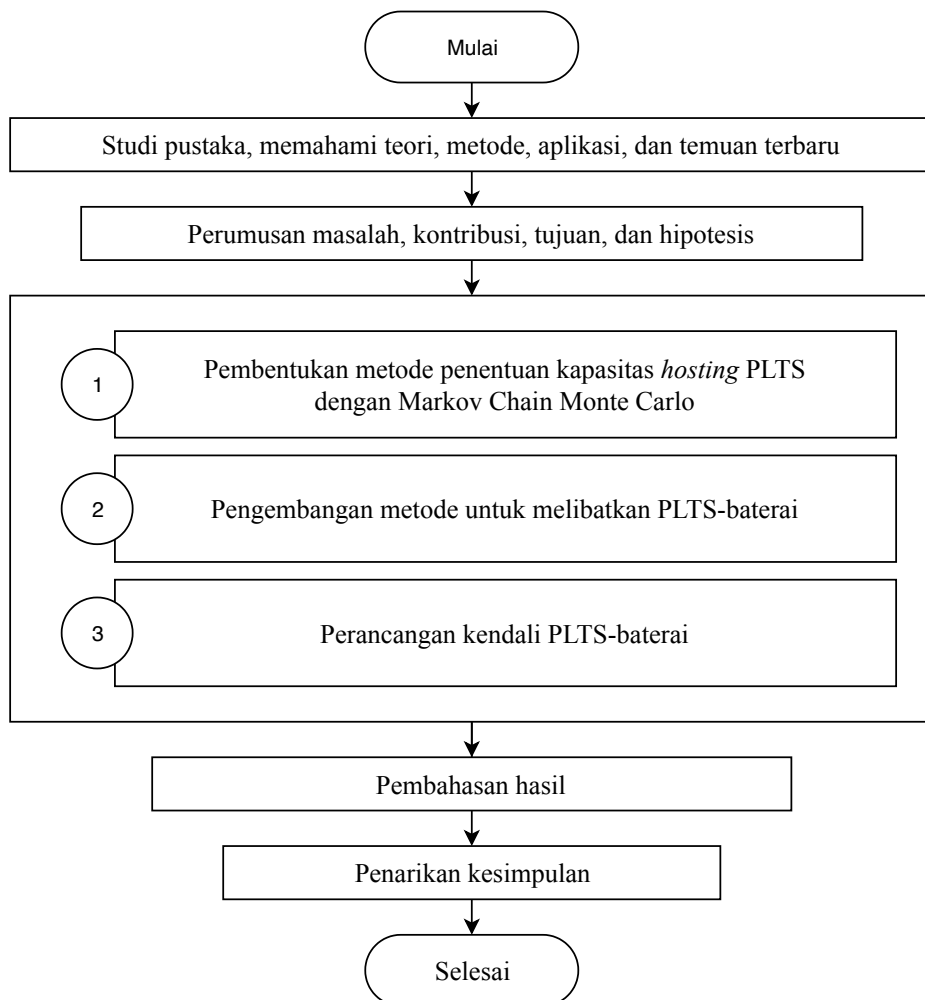
2.3 Hipotesis

Pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dan baterai dapat meningkatkan tingkat representatif dan akurasi tanpa menambah waktu komputasi, jika dibandingkan dengan metode sebelumnya yaitu Monte Carlo.

BAB III

USULAN METODE

Dalam penelitian ini, metode penentuan kapasitas *hosting* pada penetrasi skala besar dari PLTS atap dengan baterai dikembangkan. Hal tersebut dicapai dengan menambahkan variabel-variabel ketidakpastian seperti profil beban dan daya keluaran PLTS. Untuk mencapai tujuan tersebut, usulan metode penelitian dijelaskan pada bab ini. Ilustrasi ddiagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian ini dimulai dengan



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

melakukan studi pustaka. Studi pustaka dilakukan untuk hal-hal yang berkaitan dengan pengembangan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Dalam studi pustaka tersebut, teori, metode, aplikasi, dan temuan baru dipelajari. Langkah selanjutnya adalah peru-

musan masalah, pengidentifikasian kontribusi, penetapan tujuan, dan penetapan hipotesis.

Setelah itu, bagian penting dalam penelitian ini dilakukan. Bagian ini dibagi menjadi tiga tahap. Pada setiap tahapan ini, terjadi proses pembentukan metode, implementasi, uji validitas, pembahasan, dan kesimpulan. Kesimpulan dari satu tahapan digunakan pada tahapan selanjutnya. Tahapan-tahapan penelitian ini dibentuk untuk memudahkan peneliti dalam melakukan penelitian dan menguji metode. Satu hal yang cukup penting, dengan membagi menjadi tahapan-tahapan tersebut maka proses penelitian dapat diukur dengan jelas. Mekanisme pengukurannya adalah dengan menghasilkan minimal satu publikasi ilmiah untuk setiap tahapan.

Tahap pertama adalah pembentukan metode penentuan kapasitas *hosting* PLTS dengan pendekatan Markov Chain Monte Carlo. Pada tahap ini, PLTS yang terintegrasi dengan baterai belum dimasukkan. Hal itu dilakukan karena fokus dari tahap ini adalah metode stokastik Markov Chain Monte Carlo dalam penentuan kapasitas *hosting* PLTS. Dalam tahap ini, sebagai proses validasi, metode yang dibentuk akan diuji dengan sistem tenaga listrik riil atau *test feeder*. Terakhir, target luaran dari tahap ini adalah artikel penelitian. Pada akhir tahap ini, laporan akhir penelitian sudah mulai dikerjakan. Tahap kedua adalah pengembangan metode dari tahap pertama dengan melibatkan penetrasi PLTS yang terintegrasi dengan baterai, PLTS-baterai. Keluaran berupa artikel penelitian juga ditargetkan pada tahap kedua ini. Tahap ketiga adalah pengembangan metode dari tahap kedua dengan mekanisme kendali baterai. Pada tahap terakhir ini, target luaran berupa artikel penelitian juga ditetapkan. Selanjutnya adalah pembahasan hasil. Sebelum pembahasan hasil, pada bagian ini juga dilakukan proses evaluasi dan penyempurnaan dari tahap sebelumnya. Setelah itu, penarikan kesimpulan dilakukan dan laporan akhir penelitian diselesaikan.

3.1 Pembentukan Strategi Penetrasi

Pembentukan strategi penetrasi dilakukan dengan mempertimbangkan variabel ketidakpastian seperti lokasi penetrasi dan ukuran daya PLTS. Profil beban dan ukuran daya PLTS didapat dari data riil.

3.1.1 Skenario Penetrasi

Skenario penetrasi A^m adalah skenario ke- m dalam mempenetrasikan PLTS ke jaringan distribusi tenaga listrik. Skenario penetrasi A^m dirumuskan dalam himpunan A , yaitu

$$A = \{A^1, A^2, \dots, A^m, \dots, A^u\}. \quad (3-1)$$

Dalam penelitian ini, jumlah semua skenario penetrasi u juga merepresentasikan jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo.

3.1.2 States dari Markov Chain Monte Carlo

Pada penelitian ini, *states* dari Markov Chain Monte Carlo merepresentasikan kluster yang mungkin dari pelanggan, yaitu

$$Y = \{y|y \text{ adalah kluster dari pelanggan}\}. \quad (3-2)$$

Dalam hal ini, *state* y_i adalah *state* sebelumnya dari y_i . Keduanya merupakan nilai keluaran dari y .

3.1.3 Proses Penetrasi

Skenario penetrasi ke- m terdiri atas sejumlah PLTS dengan ukuran daya dan lokasi penetrasi yang berbeda-beda. Untuk setiap skenario penetrasi, proses melakukan penetrasi ke- $\{j, k\}$ yang merepresentasikan ukuran daya dan lokasi penetrasi disebut sebagai proses penetrasi $a_{j,k}^m$. Hal ini dirumuskan sebagai

$$A^m = \{a_{j,1}^m, a_{j,2}^m, \dots, a_{j,k}^m, \dots, a_{j,w}^m\}. \quad (3-3)$$

Dengan skenario penetrasi sebanyak u dan proses penetrasi sebanyak w maka dihasilkan total kombinasi acak dari ukuran daya dan lokasi penetrasi sebanyak $u \cdot w$.

3.1.4 Pelanggan Penetrasi

Dalam penelitian ini, pelanggan penetrasi $c_{j,k}^m$ didefinisikan sebagai pelanggan saat ini yang dipilih secara acak untuk mengintegrasikan PLTS ke jaringan distribusi tenaga

listrik. Pelanggan penetrasi dipilih untuk proses penetrasi ke- $\{m, j, k\}$. Hal ini didefinisikan sebagai

$$C_j^m = \{c_{j,1}^m, c_{j,2}^m, \dots, c_{j,k}^m, \dots, c_{j,w}^m\}. \quad (3-4)$$

Untuk setiap proses penetrasi ke- k , dipilih satu pelanggan penetrasi $c_{j,k}^m$. Oleh karena itu, jika simulasi Markov Chain Monte Carlo sebanyak u dikerjakan maka terdapat skenario penetrasi sebanyak u untuk setiap pelanggan penetrasi. Hal ini dirumuskan sebagai

$$C_j^k = \{c_{j,1}^k, c_{j,2}^k, \dots, c_{j,m}^k, \dots, c_{j,u}^k\}. \quad (3-5)$$

3.1.5 Ukuran Daya Penetrasi

Ukuran daya penetrasi PLTS $x_{j,k}^m$ ditentukan secara bersamaan. Untuk pelanggan yang hanya mengintegrasikan PLTS, ukuran daya yang digunakan hanya PLTS. Pada pelanggan yang mengintegrasikan PLTS dan baterai, baik PLTS maupun baterai ditentukan ukuran daya masing-masing. Ukuran daya penetrasi $x_{j,k}^m$ didasarkan pada skenario ke- m , kluster ke- j , dan proses penetrasi ke- k . Dengan kata lain, ukuran daya penetrasi $x_{j,k}^m$ adalah ukuran daya dari PLTS untuk pelanggan penetrasi $c_{j,k}^m$. Ukuran daya penetrasi dipilih dari data historis D melalui proses Markov Chain Monte Carlo. Ukuran daya penetrasi $x_{j,k}^m$ dirumuskan dalam himpunan ukuran daya penetrasi X_j^m sebagai

$$X_j^m = \{x_{j,1}^m, x_{j,2}^m, \dots, x_{j,k}^m, \dots, x_{j,w}^m\}, \quad (3-6)$$

dan dapat dirumuskan sebagai

$$X_j^k = \{x_{j,1}^k, x_{j,2}^k, \dots, x_{j,m}^k, \dots, x_{j,u}^k\}. \quad (3-7)$$

3.1.6 Level Penetrasi Pelanggan

Untuk setiap skenario penetrasi, level penetrasi pelanggan cp_k^m adalah jumlah total dari pelanggan-pelanggan penetrasi dari awal simulasi sampai proses penetrasi ke- k . Secara matematis, level penetrasi pelanggan cp_k^m didefinisikan sebagai

$$cp_k^m = k, \quad (3-8)$$

dan untuk semua penetrasi,

$$cp_w^m = w, \quad (3-9)$$

kemudian, himpunan level penetrasi pelanggan CP^m dirumuskan sebagai

$$CP^m = \{cp_1^m, cp_2^m, \dots, cp_k^m, \dots, cp_w^m\}. \quad (3-10)$$

3.1.7 Level Penetrasi Daya

Jumlah total ukuran daya yang telah dipenetrasi ke jaringan distribusi tenaga listrik ke- $\{m, k\}$ didefinisikan sebagai level penetrasi daya xp_k^m . Level penetrasi daya xp_k^m didefinisikan sebagai

$$xp_k^m = \sum_{j=1}^k x_{j,k}^m, \quad (3-11)$$

jika telah tercapai 100% penetrasi maka

$$xp_w^m = \sum_{k=1}^w x_{j,k}^m, \quad (3-12)$$

kemudian, himpunan level penetrasi daya XP^m dirumuskan sebagai

$$XP^m = \{xp_1^m, xp_2^m, \dots, xp_k^m, \dots, xp_w^m\}. \quad (3-13)$$

3.1.8 Lokasi Penetrasi

Lokasi penetrasi $l_{j,k}^m$ didasarkan pada lokasi pelanggan penetrasi $c_{j,k}^m$ yang dipilih. Oleh karena itu, lokasi penetrasi $l_{j,k}^m$ dirumuskan sebagai

$$l_{j,k}^m = location(c_{j,k}^m), \quad (3-14)$$

dan himpunan lokasi penetrasi $l_{j,k}^m$ dapat didefinisikan sebagai

$$L_j^m = \{l_{j,1}^m, l_{j,2}^m, \dots, l_{j,k}^m, \dots, l_{j,w}^m\}. \quad (3-15)$$

3.2 Pembentukan Markov Chain Monte Carlo

Pembentukan metode Markov Chain Monte Carlo untuk penentuan kapasitas *hosting* PLTS dapat dilakukan dengan mendefinisikan matriks probabilitas transisi, jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo, dan kapasitas *hosting* PLTS.

3.2.1 Matriks Probabilitas Transisi

Data historis penetrasi-penetrasi PLTS diperlukan untuk membentuk matriks probabilitas transisi. Berkaitan dengan hal tersebut, penelitian ini menggunakan data historis penetrasi-penetrasi PLTS dari *California Distributed Generation Statistics* [79]. Data tersebut dihimpu dalam himpunan D . Pembentukan matriks probabilitas transisi diawali dengan menghitung probabilitas-probabilitas transisi untuk semua *state* dalam himpunan D . Selanjutnya, nilai-nilai probabilitas transisi yang didapat dimasukkan sebagai anggota-anggota matriks probabilitas transisi. Prosedur untuk membentuk matriks probabilitas transisi dijelaskan pada Algoritme 1. Untuk menghitung probabilitas tran-

Algorithm 1 Matriks Probabilitas Transisi

```
1: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICPENETRATION
2:   Create sorted data set  $D$ 
3: end procedure
4:
5: procedure MAKESETMARKOVSTATES
6:   MAKESETPHOTOVOLTAICPENETRATION
7:   Create set  $Y$  from set  $D$ 
8: end procedure
9:
10: function TRANSPROBMATRIX
11:   MAKESETMARKOVSTATES
12:   for each  $\{y_i, y_j\}$  in  $Y$  do
13:      $y_i \leftarrow$  prior outcome value
14:      $y_j \leftarrow$  posterior outcome value
15:     Calculate  $p_{ij}$  using Eq. (3-16)
16:   end for
17:   Create  $r \times r$  transition probability matrix  $\mathbf{P}$  with  $p_{ij}$  as entries
18:   return matrix  $\mathbf{P}$ 
19: end function
```

si, Persamaan (2-10) dikembangkan menjadi

$$p_{ij} = Pr[a_{j,k}^m = y_j \mid a_{j,k-1}^m = y_i]. \quad (3-16)$$

Dengan mengaplikasikan Persamaan (3-16) untuk semua data penetrasi pada himpunan D , jumlah nilai probabilitas transisi sebanyak $r \cdot r$ diperoleh. Kemudian, dengan mengasumsikan bahwa \mathbf{P} adalah matriks persegi ($r \times r$), matriks probabilitas transisi \mathbf{P} dirumuskan sebagai

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_j & y_j & \dots & y_j \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_i \\ y_i \\ \vdots \\ y_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

3.2.2 Jumlah Simulasi Markov Chain Monte Carlo

Perhitungan jumlah simulasi Markov Chain Monte Carlo menggunakan Persamaan (2-11).

3.2.3 Batas Operasi Sistem Distribusi

Karena kapasitas *hosting* PLTS atap ditentukan berdasarkan pelanggaran terhadap batas operasi sistem, batas operasi sistem tenaga listrik yang digunakan perlu untuk dijelaskan. Mengacu kepada regulasi yang mengatur mengenai batas tegangan lebih [55], tegangan-tegangan *bus* tidak diperbolehkan untuk mempunyai nilai diatas 1.05 pu. Dalam penelitian ini, batas tersebut dijadikan acuan untuk menentukan ada atau tidak adanya pelanggaran batas tegangan lebih ketika PLTS-PLTS atap diintegrasikan ke sistem distribusi tegangan rendah. Dengan v_b yang didefinisikan sebagai tegangan pada *bus* ke- b , formula matematika dari batas tegangan lebih tersebut adalah

$$v_b \leq 1.05. \quad (3-17)$$

3.2.4 Kapasitas *Hosting* PLTS

Untuk setiap simulasi Markov Chain Monte Carlo, kapasitas *hosting* PLTS dihitung. Dengan $Pr[T^m = t_k^m]$ adalah probabilitas terjadinya pelanggaran pada skenario penetrasi ke- m dan proses penetrasi ke- k , perhitungan kapasitas *hosting* PLTS dilakukan

dengan

$$h^m = \min \left\{ xp_{k-1}^m \mid Pr[T^m = t_k^m] \geq \frac{1}{w} \wedge k \neq 1 \right\}. \quad (3-18)$$

Selanjutnya, untuk semua simulasi Markov Chain Monte Carlo, kapasitas *hosting* minimum h_{min} dihitung dengan

$$h_{min} = \min \{h^1, h^2, \dots, h^m, \dots, h^u\}. \quad (3-19)$$

3.3 Pembentukan Algoritme

Pembentukan algoritme untuk penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dilakukan dengan menggunakan formula-formula yang telah dibentuk, yaitu Persamaan (3-1) sampai Persamaan (3-19). Algoritme penentuan kapasitas *hosting* PLTS atap dengan pendekatan Markov Chain Monte Carlo ditunjukkan dalam Algoritme 2.

Algorithm 2 Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

```

1: procedure OBTAINLOADCURVE
2:   Obtain load curve containing load demands in time-series
3: end procedure
4:
5: procedure OBTAINPHOTOVOLTAICOUTPUT
6:   Obtain photovoltaic output in time-series
7: end procedure
8:
9: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICALLOCATION
10:  Create set  $A$  using Eq. (3-1)
11:  Create set  $A^m$  using Eq. (3-3)
12: end procedure
13:
14: procedure MAKESETCUSTOMERWITHPHOTOVOLTAIC
15:  Create  $C_j^m$  using Eq. (3-4)
16: end procedure
17:
18: procedure MAKESETPHOTOVOLTAICSIZE
19:  Create  $X_j^m$  using Eq. (3-6)
20: end procedure
21:

```

Algorithm 2 Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

```
22: function CALCULATECP
23:   Calculate  $cp_k^m$  using Eq. (3-8)
24:   return  $cp_k^m$ 
25: end function
26:
27: function CALCULATEXP
28:   Calculate  $xp_k^m$  using Eq. (3-11)
29:   return  $xp_k^m$ 
30: end function
31:
32: procedure MAKESETINTEGRATIONLOCATION
33:   Create  $L_j^m$  using Eq. (3-15)
34: end procedure
35:
36: function CALCULATEH
37:   Calculate  $h^m$  using Eq. (3-18)
38:   return  $h^m$ 
39: end function
40:
41: function PERFORMPHOTOVOLTAICALLOCATION
42:   if  $r$  changes then
43:     Update  $Y$  with remaining  $y$ 
44:   end if
45:   for each  $k$  in rooftop photovoltaic process  $a_k^m$  do
46:     TRANSPROBMATRIX( $a_k^m$ )
47:     Calculate state  $y_j$  given state  $y_i$  using matrix  $P$ 
48:   end for
49:   return State  $y_j$ 
50: end function
51:
52: function PERFORMFINITEMARKOVCHAINS
53:   OBTAINLOADCURVE
54:   OBTAINPHOTOVOLTAICOUTPUT
55:   Construct a code of the distribution grid under study
56:   Define the operational limits concerned
57:   Initialize  $m$  :  $m = 1$ 
58:   Initialize  $k$  :  $k = 1$ 
59:   Obtain  $a_k^m$ 
60:   MAKESETPHOTOVOLTAICALLOCATION
61:   Initialize  $y_j$ 
62:   Obtain  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
63:   MAKESETCUSTOMERWITHPHOTOVOLTAIC
64:   MAKESETPHOTOVOLTAICSIZE
65:   MAKESETINTEGRATIONLOCATION
```

Algorithm 2 Markov Chain Monte Carlo untuk Penentuan Kapasitas *Hosting* Stokastik

```
66:   while  $m$  in  $cp_k^m \neq u$  do
67:     CALCULATECP
68:     CALCULATEXP
69:     if  $m \geq 2$  then
70:       Update  $a_k^m$ 
71:     end if
72:     while  $k$  in  $cp_k^m \neq w$  do
73:       if  $k \geq 2$  then
74:          $y_i \leftarrow y_j$ 
75:         PERFORMPHOTOVOLTAICALLOCATION
76:         Determine  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
77:       end if
78:       Penetrate rooftop photovoltaic using  $c_{j,k}^m$ ,  $x_{j,k}^m$ , and  $l_{j,k}^m$ 
79:       Run power flow in time-series
80:       Evaluate the results using the operational limits
81:       if violation occurs at  $xp_k^m$  then
82:         Determine  $xp_{k-1}^m$  as rooftop photovoltaic hosting capacity
83:       end if
84:       Update  $k$  :  $k = k + 1$ 
85:     end while
86:     Calculate  $h_{min}$  using Eq. (3-19)
87:     Update  $m$  :  $m = m + 1$ 
88:   end while
89:   return  $A^m$ ,  $C_j^m$ ,  $X_j^m$ ,  $CP^m$ ,  $XP^m$ ,  $L_j^m$ , and  $h_{min}$ 
90:   Record the desired results
91: end function
```

BAB V

JADWAL PENELITIAN

Aktivitas	2020						2021						2021					
	Semester I						Semester II						Semester III					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
Studi pustaka	■	■	■	■	■													
Identifikasi permasalahan	■	■	■	■	■													
Pengambilan data			■	■	■	■												
Pemodelan sistem distribusi			■	■	■	■												
Uji validitas model sistem distribusi			■	■	■	■												
Penyusunan proposal				■	■	■	■	■										
Ujian komprehensif								■	■									
Perancangan model kapasitas <i>hosting</i> dengan Markov Chain Monte Carlo								■	■	■								
Pengujian dan evaluasi akurasi								■	■	■								
Analisis dan pembahasan								■	■	■	■	■						
Penyusunan/pengiriman artikel I										■	■	■	■					
Perancangan model kapasitas <i>hosting</i> dengan memasukkan PLTS-baterai dan studi kasus												■	■	■	■	■		
Pengujian dan evaluasi akurasi												■	■	■	■	■		
Analisis dan pembahasan													■	■	■	■	■	■
Penyusunan/pengiriman artikel II														■	■	■	■	■
Seminar hasil I																	■	■

Aktivitas	2021						2022						2022					
	Semester IV						Semester V						Semester VI					
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Perancangan model kapasitas <i>hosting</i> dengan kendali PLTS-baterai dan studi kasus	■	■	■															
Pengujian dan evaluasi akurasi		■	■	■	■													
Analisis dan pembahasan			■	■	■	■	■											
Penyusunan/pengiriman artikel III				■	■	■	■											
Pengembangan Markov Chain Monte Carlo						■	■	■	■									
Pengujian dan evaluasi akurasi							■	■	■	■								
Analisis dan pembahasan								■	■	■	■	■						
Penyusunan/pengiriman artikel IV									■	■	■	■	■					
Seminar hasil II													■	■				
Perbaikan dan penyelesaian laporan													■	■	■	■	■	■
Ujian tertutup																	■	■

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency Photovoltaics Power Systems, “2020 Snapshot of Global PV Markets,” International Energy Agency, Tech. Rep., 2020.
- [2] International Renewable Energy Agency, “Renewable Capacity Statistics 2020,” International Renewable Energy Agency, Tech. Rep., 2020.
- [3] M. Hasheminamin, V. G. Agelidis, V. Salehi, R. Teodorescu, and B. Hredzak, “Index-Based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder under High PV Penetration,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 4, pp. 1158–1168, 2015.
- [4] M. J. Reno, K. Coogan, J. Seuss, and R. J. Broderick, “Novel Methods to Determine Feeder Locational PV Hosting Capacity and PV Impact Signatures,” Sandia National Laboratories, Tech. Rep. July, 2016.
- [5] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. Van Cutsem, “Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 926–936, 2016.
- [6] D. Santos-Martin and S. Lemon, “Simplified Modeling of Low Voltage Distribution Networks for PV Voltage Impact Studies,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1924–1931, 2016.
- [7] A. Y. Elrayyah, M. Z. Wanik, and A. Bouselham, “Simplified Approach to Analyze Voltage Rise in LV Systems With PV Installations Using Equivalent Power Systems Diagrams,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, pp. 2140–2149, 2017.
- [8] H. Mortazavi, H. Mehrjerdi, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, and L. Lenoir, “A Monitoring Technique for Reversed Power Flow Detection with High PV Penetration Level,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2221–2232, 2015.
- [9] M. Andresen, G. Buticchi, and M. Liserre, “Thermal Stress Analysis and MPPT Optimization of Photovoltaic Systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 8, pp. 4889–4898, 2016.
- [10] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, 2011.
- [11] P. A. Gooding, E. Makram, and R. Hadidi, “Probability Analysis of Distributed Generation for Island Scenarios Utilizing Carolinas Data,” *Electric Power Systems Research*, vol. 107, pp. 125–132, 2014.
- [12] A. Dubey and S. Santoso, “On Estimation and Sensitivity Analysis of Distribution Circuit’s Photovoltaic Hosting Capacity,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2779–2789, 2017.

- [13] S. Wang, Y. Dong, L. Wu, and B. Yan, "Interval Overvoltage Risk Based PV Hosting Capacity Evaluation Considering PV and Load Uncertainties," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2709–2721, 2020.
- [14] R. Torquato, D. Salles, C. O. Pereira, P. C. M. Meira, and W. Freitas, "A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 1002–1012, 2018.
- [15] V. Behraves, R. Keypour, and A. A. Foroud, "Stochastic Analysis of Solar and Wind Hybrid Rooftop Generation Systems and Their Impact on Voltage Behavior in Low Voltage Distribution Systems," *Solar Energy*, vol. 166, no. June 2017, pp. 317–333, 2018.
- [16] S. Conti and S. Raiti, "Probabilistic Load Flow Using Monte Carlo Techniques for Distribution Networks with Photovoltaic Generators," *Solar Energy*, vol. 81, no. 12, pp. 1473–1481, 2007.
- [17] R. A. Shayani, M. A. G. de Oliveira, and M. D. Oliveira, "Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1625–1631, 2011.
- [18] M. N. Kabir, Y. Mishra, and R. C. Bansal, "Probabilistic Load Flow for Distribution Systems with Uncertain PV Generation," *Applied Energy*, vol. 163, pp. 343–351, 2016.
- [19] S. Heslop, I. MacGill, and J. Fletcher, "Maximum PV Generation Estimation Method for Residential Low Voltage Feeders," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 7, pp. 58–69, 2016.
- [20] R. Luthander, D. Lingfors, and J. Widén, "Large-Scale Integration of Photovoltaic Power in A Distribution Grid Using Power Curtailment and Energy Storage," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1319–1325, 2017.
- [21] M. Emmanuel and R. Rayudu, "The Impact of Single-Phase Grid-Connected Distributed Photovoltaic Systems on the Distribution Network Using P-Q and P-V Models," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 91, pp. 20–33, 2017.
- [22] M. A. Abdelkader, Z. H. Osman, and M. A. Elshahed, "New Analytical Approach for Simultaneous Feeder Reconfiguration and DG Hosting Allocation in Radial Distribution Networks," *Ain Shams Engineering Journal*, 2020.
- [23] C. Wang and M. H. Nehrir, "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068–2076, 2004.
- [24] T. Gözel and M. H. Hocaoglu, "An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 6, pp. 912–918, 2009.

- [25] G. Mokryani, Y. F. Hu, P. Papadopoulos, T. Niknam, and J. Aghaei, "Deterministic Approach for Active Distribution Networks Planning with High Penetration of Wind and Solar Power," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 942–951, 2017.
- [26] R. H. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, "Operation and Planning of Distribution Networks with Integration of Renewable Distributed Generators Considering Uncertainties: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. May 2016, pp. 1177–1198, 2017.
- [27] S. Breker, A. Claudi, and B. Sick, "Capacity of Low-Voltage Grids for Distributed Generation: Classification by Means of Stochastic Simulations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 689–700, 2015.
- [28] M. Kolenc, I. Papič, and B. Blažič, "Assessment of Maximum Distributed Generation Penetration Levels in Low Voltage Networks Using a Probabilistic Approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 505–515, 2015.
- [29] M. H. Bollen and S. K. Rönnerberg, "Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment," *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017.
- [30] G. Mokhtari, A. Ghosh, G. Nourbakhsh, and G. Ledwich, "Smart Robust Resources Control in LV Network to Deal with Voltage Rise Issue," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 1043–1050, 2013.
- [31] M. J. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "Mitigation of Rooftop Solar PV Impacts and Evening Peak Support by Managing Available Capacity of Distributed Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3874–3884, 2013.
- [32] V. T. Tran, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Robust Power Management Strategy with Multi-Mode Control Features for an Integrated PV and Energy Storage System to Take the Advantage of ToU Electricity Pricing," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 2110–2120, 2019.
- [33] International Renewable Energy Agency, "Behind-The-Meter Batteries," International Renewable Energy Agency, Tech. Rep., 2019.
- [34] A. Dubey, S. Santoso, and A. Maitra, "Understanding Photovoltaic Hosting Capacity of Distribution Circuits," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015.
- [35] T. Beck, H. Kondziella, G. Huard, and T. Bruckner, "Assessing the Influence of the Temporal Resolution of Electrical Load and PV Generation Profiles on Self-Consumption and Sizing of PV-Battery Systems," *Applied Energy*, vol. 173, pp. 331–342, 2016.
- [36] Electric Power Research Institute, "Current Utility Screening Practices, Technical Tools, Impact Studies, and Mitigation Strategies for Interconnecting PV on the Electric Distribution Systems," Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2014.

- [37] M. Rylander, J. Smith, and W. Sunderman, "Streamlined Method for Determining Distribution System Hosting Capacity," in *IEEE Rural Electric Power Conference*, 2015.
- [38] G. B. Dantzig, "Linear Programming Under Uncertainty," *International Series in Operations Research and Management Science*, vol. 150, pp. 1–11, 2011.
- [39] K. N. Hasan, R. Preece, and J. V. Milanović, "Existing Approaches and Trends in Uncertainty Modelling and Probabilistic Stability Analysis of Power Systems with Renewable Generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 168–180, 2019.
- [40] A. Kharrazi, V. Sreeram, and Y. Mishra, "Assessment Techniques of the Impact of Grid-Tied Rooftop Photovoltaic Generation on the Power Quality of Low Voltage Distribution Network - A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, pp. 1–16, 2020.
- [41] F. Shahnia, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Voltage Imbalance Analysis in Residential Low Voltage Distribution Networks with Rooftop PVs," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 9, pp. 1805–1814, 2011.
- [42] F. Ding and B. Mather, "On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1010–1020, 2017.
- [43] F. J. Ruiz-Rodriguez, J. C. Hernández, and F. Jurado, "Probabilistic Load Flow for Photovoltaic Distributed Generation Using the Cornish-Fisher Expansion," *Electric Power Systems Research*, vol. 89, pp. 129–138, 2012.
- [44] E. N. Silva, A. B. Rodrigues, and M. Da Guia Da Silva, "Stochastic Assessment of the Impact of Photovoltaic Distributed Generation on the Power Quality Indices of Distribution Networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 135, pp. 59–67, 2016.
- [45] M. Al-Saffar and P. Musilek, "Reinforcement Learning-Based Distributed BESS Management for Mitigating Overvoltage Issues in Systems With High PV Penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2980–2994, 2020.
- [46] S. Hashemi and J. Østergaard, "Efficient Control of Energy Storage for Increasing the PV Hosting Capacity of LV Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2295–2303, 2018.
- [47] Y. Yang, H. Li, A. Aichhorn, J. Zheng, and M. Greenleaf, "Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System with High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 982–991, 2014.
- [48] A. Navarro-Espinosa and L. F. Ochoa, "Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2192–2203, 2016.

- [49] A. Arshad, M. Lindner, and M. Lehtonen, "An Analysis of Photo-Voltaic Hosting Capacity in Finnish Low Voltage Distribution Networks," *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1–16, 2017.
- [50] J. E. R. Baptista, A. B. Rodrigues, and M. Da Guia Da Silva, "Probabilistic Analysis of PV Generation Impacts on Voltage Sags in LV Distribution Networks Considering Failure Rates Dependent on Feeder Loading," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1342–1350, 2019.
- [51] Electric Power Research Institute, "Stochastic Analysis to Determine Feeder Hosting Capacity for Distributed Solar PV," Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2012.
- [52] M. Deakin, C. Crozier, D. Apostolopoulou, T. Morstyn, and M. McCulloch, "Stochastic Hosting Capacity in LV Distribution Networks," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2019.
- [53] P. P. Vergara, M. Salazar, T. T. Mai, P. H. Nguyen, and H. Slootweg, "A Comprehensive Assessment of PV Inverters Operating with Droop Control for Overvoltage Mitigation in LV Distribution Networks," *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 172–183, 2020.
- [54] EN Std. 50160, "Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems," 2000.
- [55] ANSI Std. C84.1, "American National Standard for Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz)," 2011.
- [56] IEC 60038:2002, "IEC Standard Voltages," 2002.
- [57] J. Lee and G. H. Kim, "Comparison Analysis of the Voltage Variation Ranges for Distribution Networks," in *Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2017*. IEEE, 2017, pp. 28–30.
- [58] M. H. J. Bollen and M. Häger, "Power Quality: Interactions Between Distributed Energy Resources, the Grid, and Other Customers," *Electric Power Quality and Utilisation Magazine*, vol. 1, pp. 51–61, 2005.
- [59] B. Palmintier, R. Broderick, B. Mather, M. Coddington, K. Baker, F. Ding, M. Reno, M. Lave, and A. Bharatkumar, "On the Path to SunShot: Emerging Issues and Challenges in Integrating Solar with the Distribution System," National Renewable Energy Laboratory and Sandia National Laboratories, Tech. Rep., 2016.
- [60] Electric Power Research Institute, "Grid Impacts of Distributed Generation with Advanced Inverter Functions," Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2013.
- [61] S. Tao, C. Li, L. Zhang, and Y. Tang, "Operational Risk Assessment of Grid-Connected PV System Considering Weather Variability and Component Availability," *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 252–258, 2018.

- [62] F. Vallée, C. Versèle, J. Lobry, and F. Moiny, “Non-Sequential Monte Carlo Simulation Tool in Order to Minimize Gaseous Pollutants Emissions in Presence of Fluctuating Wind Power,” *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 317–324, 2013.
- [63] P. Arun, R. Banerjee, and S. Bandyopadhyay, “Optimum Sizing of Photovoltaic Battery Systems Incorporating Uncertainty Through Design Space Approach,” *Solar Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 1013–1025, 2009.
- [64] E. Zio, M. Delfanti, L. Giorgi, V. Olivieri, and G. Sansavini, “Monte Carlo Simulation-Based Probabilistic Assessment of DG Penetration in Medium Voltage Distribution Networks,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 64, pp. 852–860, 2015.
- [65] R. Billinton, “Evaluation of reliability worth in an electric power system,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 9, no. 3, pp. 1318–1326, 1994.
- [66] Q. Zhao, P. Wang, L. Goel, and Y. Ding, “Evaluation of Nodal Reliability Risk in A Deregulated Power System with Photovoltaic Power Penetration,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 3, pp. 421–430, 2014.
- [67] J. D. Watson, N. R. Watson, D. Santos-Martin, A. R. Wood, S. Lemon, and A. J. Miller, “Impact of Solar Photovoltaics on the Low-Voltage Distribution Network in New Zealand,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [68] J. E. Smith, M. E. Rylander, R. S. N. L. Broderick, and B. N. Mather, “Alternatives to the 15% Rule - Modeling and Hosting Capacity Analysis of 16 Feeders,” Electric Power Research Institute, Tech. Rep., 2015.
- [69] B. Bletterie, S. Kadam, R. Bolgarny, and A. Zegers, “Voltage Control with PV Inverters in Low Voltage Networks-In Depth Analysis of Different Concepts and Parameterization Criteria,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 177–185, 2017.
- [70] A. Nourai, R. Sastry, and T. Walker, “A Vision & Strategy for Deployment of Energy Storage in Electric Utilities,” *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, pp. 1–4, 2010.
- [71] B. P. Roberts and C. Sandberg, “The Role of Energy Storage in Development of Smart Grids,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1139–1144, 2011.
- [72] B. Lu and M. Shahidehpour, “Short-Term Scheduling of Battery in A Grid-Connected PV/Battery System,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1053–1061, 2005.
- [73] N. Jayasekara, M. A. Masoum, and P. J. Wolfs, “Optimal Operation of Distributed Energy Storage Systems to Improve Distribution Network Load and Generation Hosting Capability,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250–261, 2016.

- [74] P. Hasanpor Divshali and L. Soder, "Improving Hosting Capacity of Rooftop PVs by Quadratic Control of an LV-Central BSS," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 919–927, 2019.
- [75] D. Revuz, *Markov Chains*. Elsevier, 1984.
- [76] P. Louangrath, "Sample Size Determination for Non-Finite Population," in *International Conference on Discrete Mathematics and Applied Sciences*, 2014, pp. 1–24.
- [77] J. Arroyo and C. Mate, "Introducing Interval Time Series: Accuracy Measures," in *COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics*, 2006, pp. 1–8.
- [78] J. Arroyo, R. Espínola, and C. Maté, "Different Approaches to Forecast Interval Time Series: A Comparison in Finance," *Computational Economics*, vol. 37, no. 2, pp. 169–191, 2011.
- [79] California Solar Initiative, "California Distributed Generation Statistics." [Online]. Available: <http://www.californiasolarstatistics.org>