



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ESTIMASI TEGANGAN BUS PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL
MENGUNAKAN EXTENDED BRANCH CURRENT DISTRIBUTION
SYSTEM STATE ESTIMATORS (EXTENDED BC-DSSE) BERBASIS
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)**

Brendy Chandra Supian Atmodjo
NRP 2213106022

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Soediby, M.MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**BUS VOLTAGE ESTIMATION IN RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM
USING EXTENDED BRANCH CURRENT DISTRIBUTION SYSTEM
STATE ESTIMATORS (EXTENDED BC-DSSE) BASED ON
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)**

Brendy Chandra Supian Atmodjo
NRP 2213106022

Advisor

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Dr. Ir. Soedibyso, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

ESTIMASI TEGANGAN BUS PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL MENGGUNAKAN *EXTENDED BRANCH CURRENT DISTRIBUTION SYSTEM STATE ESTIMATORS (EXTENDED BC-DSSE)* BERBASIS *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dosen Pembimbing II

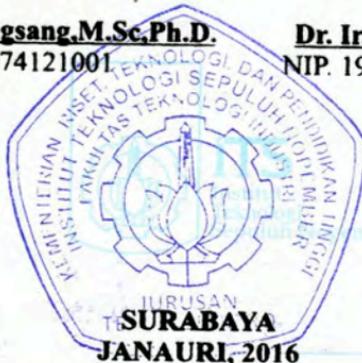


Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.

NIP.194907151974121001

Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

NIP. 195512071980031004



Estimasi Tegangan Bus pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE) Berbasis Geographic Information System (GIS)

Nama : Brendy Chandra Supian Atmodjo
NRP : 2213106022
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Monitoring sistem tenaga listrik dilakukan agar kontinuitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga. *Geographic Information System* (GIS) dapat digunakan untuk monitoring suatu sistem. Parameter yang dimonitoring salah satunya adalah tegangan. Untuk mendapatkan parameter tersebut dibutuhkan *Phasor Measurement Unit* (PMU), namun harga PMU sangat mahal apabila pada setiap bus dipasang PMU. Pengurangan PMU harus dilakukan untuk mengurangi biaya. Metode *Binary Integer Linear Programming* (BILP) digunakan untuk mengurangi jumlah alat pengukuran. Pada bus yang tidak terpasang alat pengukuran akan digunakan metode *Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE)*. Dengan Metode *Extended BC-DSSE* ini parameter tegangan pada bus yang tidak terpasang alat pengukuran bisa diketahui. Selanjutnya parameter tegangan tersebut dapat ditampilkan di GIS untuk tujuan monitoring. Metode BILP dapat mengoptimalkan jumlah PMU menjadi 64,1% dari total PMU semula sehingga biaya menjadi berkurang. Parameter tegangan yang diestimasi menggunakan metode *Extended BC-DSSE* sangat akurat dengan *error* paling besar 0,2155% jika dibandingkan dengan *running* ETAP. Monitoring dilakukan melalui GIS yang mana pada tiap busnya dapat dilihat parameter tegangan.

Kata Kunci : *Geographic Information System, Binary Integer Linear Programming, Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE)*.

***Bus Voltage Estimation in Radial Distribution System
Using Extended Branch Current Distribution System State
Estimators (Extended BC-DSSE) Based on Geographic
Information System (GIS)***

Name : Brendy Chandra Supian Atmodjo
NRP : 2213106022
Advisor : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Ir. Soediby, M.MT.

ABSTRACT

The monitoring of electrical power system was used to maintain continuity of electrical power distribution. Geographic Information System (GIS) can be used to monitor a system. Electrical voltage is one of parameters that has to be monitored and to get this parameter , the engineer will use Phasor Measurement Unit (PMU) which costs a lot of money if this PMU wanted to be installed on every bus. PMU reduction has to be done to cut down the cost. Binary Integer Linear Programming (BILP) method was used to cut down the measurement tool amount. Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE) method will be used on the measurement tool that wasn't installed on bus. Using this Extended BC-DSSE method, the electrical voltage parameter on the uninstalled measurement tool bus could be discovered. Furthermore, the electrical voltage parameter could be featured on GIS for monitoring purpose. BILP method can optimize the PMU number to 64,1% of earlier PMU, that can lessen the cost. Estimated electrical voltage parameter using Extended BC-DSSE method is very accurate with the result as the biggest error is 0,2155% compared to running ETAP. Electrical voltage parameter on each bus can be monitored by GIS.

Keywords: *Geographic Information System, Binary Integer Linear Programming, Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE).*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang mana atas rahmat dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

“Estimasi Tegangan Bus pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE) Berbasis Geographic Information System (GIS)”

Tugas Akhir ini merupakan karya tulis ilmiah yang menjadi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam hal ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak membantu terutama dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kedua orang tua atas limpahan doa, kasih sayang, dan teladan hidup bagi penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing dalam pembuatan Tugas Akhir ini yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini belum sempurna. Kritik dan saran pembaca diharapkan mampu memperbaiki kekurangan penulis dalam pembuatan laporan ini. Semoga terselesaikannya Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis serta pembaca secara luas. Terima kasih.

Surabaya, Januari 2016

Brendy Chandra Supian Atmodjo

DAFTAR ISI

HALAMAN

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Laporan	3
1.7 Relevansi	3

BAB II. STATE ESTIMATION PADA JARINGAN DISTRIBUSI

2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Sistem Distribusi	6
2.2.1. Sistem Distribusi Radial	6
2.2.2. Sistem Distribusi Loop	10
2.2.3. Jaringan Distribusi Jaring-Jaring (NET)	10
2.2.4. Jaringan Distribusi Spindle	11
2.2.5. Saluran Radial Interkoneksi	12
2.3 Analisa Aliran Daya	13
2.4 Geographic Information System (GIS)	13
2.5 Monitoring Sistem Tenaga Listrik	14
2.5.1 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)	14
2.5.2 Bagian Sistem SCADA	15
2.6. Phasor Measurement Unit (PMU)	16
2.7. Optimasi Menggunakan Binary Integer Linear Programming (BILP)	17

2.8. State Estimation.....	17
2.8.1. Weighted Least Square (WLS)	18
2.8.2. Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE)	22
BAB III. SISTEM DISTRIBUSI 20 KV DI SURABAYA	
3.1 Sistem Distribusi 20 KV Di Surabaya.....	27
3.2 Geographic Information System (GIS) Pada Sistem Distribusi	33
3.3 Binary Integer Linear Programming (BILP)	34
3.4 Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE) pada Jaringan Distribusi	37
3.5 Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE).....	39
BAB IV. SIMULASI & ANALISIS	
4.1 Peletakkan Optimal PMU	43
4.2 Simulasi State Estimation Penyulang Nginden	46
4.3 Tampilan Hasil Simulasi di Geographic Information System (GIS).....	49
BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
BIODATA PENULIS.....	A - 1

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1 Jaringan radial tipe pohon.....	7
Gambar 2.2 Jaringan radial dengan <i>tie</i> dan <i>switch</i>	8
Gambar 2.3 Jaringan radial tipe pusat beban.....	9
Gambar 2.4 Jaringan radial tipe <i>phase area</i>	9
Gambar 2.5 Sistem distribusi tipe <i>loop</i>	10
Gambar 2.6 Jaringan distribusi <i>net</i>	11
Gambar 2.7 Jaringan distribusi <i>spindle</i>	12
Gambar 2.8 Diagram satu garis penyulang radial interkoneksi	12
Gambar 2.9 Contoh rangkaian ekivalen	23
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> sistem keseluruhan	27
Gambar 3.2 Lokasi penyulang Nginden pada GIS.....	34
Gambar 3.3 Simbol trafo pada GIS.....	34
Gambar 3.4 Skema percabangan pada BILP.....	35
Gambar 3.5 <i>Three-phase line section</i>	37
Gambar 3.6 Bagian dari sistem distribusi	38
Gambar 3.7 Jaringan sederhana	38
Gambar 3.8 Contoh skema jaringan	40
Gambar 4.1 <i>Single line diagram</i> dan penempatan PMU	45
Gambar 4.2 Grafik perbandingan tegangan BC-DSSE dengan ETAP	49
Gambar 4.3 Contoh bus/gardu dengan PMU pada GIS.....	50
Gambar 4.4 Penempatan PMU di bus/gardu penyulang Nginden pada GIS	50
Gambar 4.5 Tampilan awal sebelum <i>running</i> metode <i>Extended BC-DSSE</i>	51
Gambar 4.6 Hasil <i>running</i> metode <i>Extended BC-DSSE</i>	52
Gambar 4.7 PMU pada <i>slack bus</i> dan hasil <i>state estimation</i>	52
Gambar 4.8 PMU pada gardu selain <i>slack bus</i> dan hasil <i>state estimation</i>	53
Gambar 4.9 PMU pada gardu dan hasil <i>state estimation</i>	54

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 3.1 Data panjang saluran udara penyulang Nginden	28
Tabel 3.2 Data impedansi saluran penyulang Nginden	29
Tabel 3.3 Data beban penyulang Nginden.....	31
Tabel 3.4 Nomer Gardu pada GIS penyulang Nginden.....	32
Tabel 4.1 Peletakkan PMU optimal pada penyulang Nginden.....	43
Tabel 4.2 Hasil <i>state estimation</i> pada penyulang Nginden.....	46
Tabel 4.3 Perbandingan hasil <i>Extended BC-DSSE</i> dengan ETAP ...	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Monitoring suatu sistem penting dilakukan untuk tetap menjaga kontinuitas dan kualitas daya listrik dalam distribusi Sistem Informasi Geografis /*Geographic Information System* (GIS) merupakan suatu sistem yang dapat digunakan untuk mengelola (input, manajemen dan output) data spasial atau data yang bereferensi geografis. *Geographic Information System* (GIS) dapat digunakan untuk monitoring suatu sistem. Dalam hal ini, suatu jaringan distribusi dapat dimonitoring secara real time dan parameter yang ingin dimonitoring dapat diketahui salahsatunya adalah tegangan.

Monitoring parameter yang dapat dilakukan melalui *Geographic Information System* (GIS) salah satu contohnya adalah tegangan. Untuk mendapatkan parameter tersebut dibutuhkan alat pengukuran yang terpasang pada bus yang ingin diketahui parameternya. Namun harga alat pengukuran seperti *Phasor Measurement Unit* (PMU) sangat mahal, apabila pada setiap bus dipasang PMU maka biaya yang dikeluarkan menjadi sangat besar. Selain itu bisa saja terjadi kesalahan pengukuran karena peralatannya rusak.

Untuk mengatasi hal itu. digunakan *Binary Integer Linear Programming* (BILP) untuk mengurangi jumlah PMU. Pada bus yang tidak terpasang alat pengukuran akan diestimasi dengan metode *state estimation* yaitu *Extended Branch Current Distribution System State Estimators* (*Extended BC-DSSE*) sehingga mendapatkan parameter tegangan. *Extended BC-DSSE* merupakan pengembangan dari metode *state estimation* yang lain yaitu metode *Weighted Least Square* (WLS). Hasil tegangan dari metode *state estimation* ini akan ditampilkan melalui GIS untuk tujuan monitoring.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas berkaitan dengan Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Menentukan peletakkan optimal PMU
2. Menentukan tegangan bus jaringan distribusi radial dengan metode *Extended Branch Current Distribution System State Estimators* (*Extended BC-DSSE*).

3. Menampilkan tegangan hasil *state estimation* melalui *Geographic Information System* (GIS)

1.3 Batasan Masalah

Dalam penyelesaian masalah dalam Tugas Akhir ini, terdapat batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan untuk monitoring adalah *Geographic Information System* (GIS)
2. Metode yang digunakan untuk peletakkan optimal PMU adalah *Binary Integer Linear Programming* (BILP)
3. Jaringan distribusi yang digunakan adalah jaringan distribusi radial satu fasa
4. Metode *state estimation* yang digunakan adalah metode *Extended Branch Current Distribution System State Estimators* (*Extended BC-DSSE*).

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Mengetahui nilai tegangan pada bus
2. Monitoring tegangan hasil *state estimation* melalui GIS

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan Sistem
Memodelkan jaringan yang akan diestimasi ke dalam *software* ETAP dan GIS.
2. State estimasi tegangan pada bus
Melakukan state estimasi pada bus dengan metode *Extended Branch Current Distribution System State Estimators* (*Extended BC-DSSE*) sehingga dapat diketahui parameter tegangannya.
3. Menampilkan hasil *state estimation* melalui GIS
Tegangan bus ditampilkan melalui GIS sehingga dapat dimonitoring untuk keperluan distribusi listrik.
4. Menarik kesimpulan
Hasil tegangan yang diperoleh dari metode *Extended Branch Current Distribution System State Estimators* (*Extended BC-*

DSSE) akan dibandingkan dengan tegangan bus yang diperoleh dari *software* ETAP.

1.6 Sistematika Laporan

Dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini, pembahasan mengenai sistem alat yang dibuat dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batas masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.
- Bab 2 : Teori penunjang meliputi pembahasan secara singkat yang akan digunakan dalam menyelesaikan permasalahan, teori umum tentang sistem distribusi, analisa aliran daya, SCADA, PMU, *state estimation* dan GIS.
- Bab 3 : Pembahasan teori *Extended Branch Current Distribution System State Estimators (Extended BC-DSSE)* dan teori *Binary Integer Linear Programming*.
- Bab 4 : Hasil simulasi penempatan PMU dan *state estimation* di GIS pada sistem distribusi Surabaya penyulang Nginden.
- Bab 5 : Kesimpulan dan saran dari Tugas Akhir yang dikerjakan. Kelebihan dan kekurangan yang dapat dikembangkan dari Tugas Akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari penelitian Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat antara lain:

1. Jumlah PMU dapat dikurangi sehingga mengurangi biaya
2. Monitoring tegangan bus pada sistem distribusi menjadi lebih optimal

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

STATE ESTIMATION PADA JARINGAN DISTRIBUSI

2.1 Sistem Tenaga Listrik [1]

Energi listrik sangat penting dan menjadi kebutuhan pokok. Energi listrik dapat dibangkitkan dengan mengubah energi lain seperti energi mekanik, energi dan potensial lain. Energi listrik ini disalurkan dari pembangkit menuju konsumen melalui sistem saluran distribusi tenaga listrik. Baik atau tidaknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik dilihat dari kualitas daya yang diterima oleh konsumen. Kualitas daya ditentukan dari kapasitas daya yang memenuhi dan tegangan yang selalu konstan pada tegangan nominal.

Tegangan harus selalu dijaga konstan agar mendapat kualitas daya yang baik. Tegangan yang tidak stabil dapat mengakibatkan kerusakan alat-alat yang sensitif terhadap perubahan tegangan (khususnya alat-alat elektronik). Tegangan yang terlalu rendah dapat mengakibatkan alat-alat listrik tidak dapat beroperasi namun apabila tegangan terlalu tinggi dapat merusak alat-alat listrik.

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga komponen yaitu pembangkit listrik, saluran transmisi, dan saluran distribusi. Tiap komponen tersebut saling bergantung satu sama lain. Penjelasan tiap komponennya adalah sebagai berikut:

1. Pembangkit tenaga listrik (pembangkitan): berfungsi membangkitkan energi listrik dengan cara merubah energi mekanik menjadi energi listrik.
2. Sistem transmisi (penyaluran): proses menyalurkan energi listrik dari satu tempat ke tempat lain (dari pembangkit listrik ke gardu induk atau dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya), dengan menggunakan penghantar yang direntangkan antara tiang-tiang melalui isolator-isolator, dengan sistem tegangan tinggi.
3. Sistem distribusi (distribusi): pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke instalasi pemanfaatan (pelanggan).
4. Instalasi milik pelanggan (pemanfaatan): pihak yang memanfaatkan energi listrik.

Fungsi dari jaringan distribusi adalah menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk distribusi kepada

pelanggan listrik. Kontinuitas pelayanan tergantung pada topologi dan konstruksi jaringan serta peralatan tegangan menengah adalah salah satu unsur dari mutu pelayanan.

Masalah utama dalam menjalankan fungsi jaringan distribusi tersebut adalah mengatasi gangguan dengan cepat mengingat gangguan yang terbanyak dalam sistem tenaga listrik terdapat dalam jaringan distribusi, khususnya jaringan tegangan menengah 20 KV.

2.2 Sistem Distribusi [1]

Sistem distribusi digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat - pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Secara umum berdasarkan bentuk konfigurasi jaringan, sistem distribusi dibagi menjadi beberapa sistem.

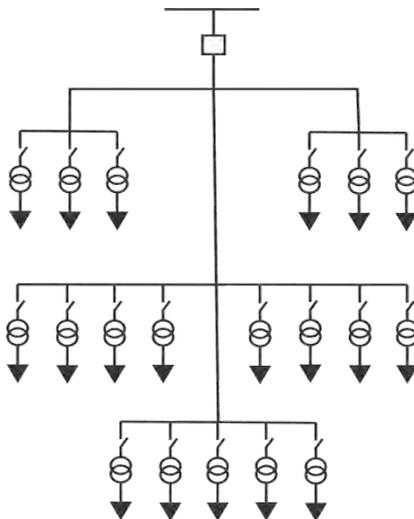
2.2.1 Sistem Distribusi Radial

Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani. Satu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan - pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama.

Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula. Untuk melokalisir gangguan, pada bentuk radial ini biasanya diperlengkapi dengan peralatan pengaman berupa *fuse*, *sectionalizer*, *recloser*, atau alat pemutus beban lainnya, tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah/dibelakang titik gangguan, selama gangguan belum teratasi. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

1. Biaya investasinya relatif murah.
2. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
3. Bentuknya sederhana.
4. Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami *black out* secara total.

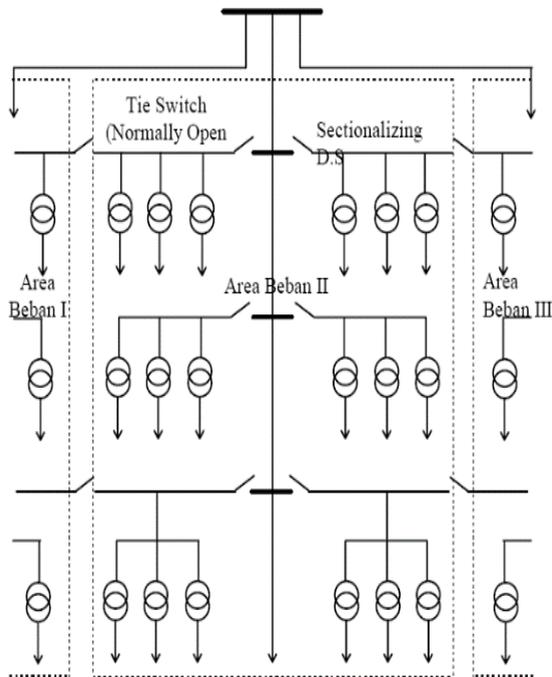
Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi seperti jaringan radial tipe pohon seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Satu saluran utama dibentang menurut kebutuhan, selanjutnya saluran utama dicabangkan dengan saluran cabang dan lateral penyulang ini dicabang-cabang lagi dengan sublateral penyulang (anak cabang). Sesuai dengan kerapatan arus yang ditanggung masing-masing saluran, ukuran penyulang utama adalah yang terbesar, ukuran lateral adalah lebih kecil dari penyulang utama, dan ukuran sub lateral adalah yang terkecil.



Gambar 2.1 Jaringan radial tipe pohon

Selanjutnya adalah jaringan radial dengan *tie* dan *switch* pemisah seperti pada gambar 2.2. Bentuk ini merupakan modifikasi bentuk dasar dengan menambahkan *tie* dan *switch* pemisah, yang diperlukan untuk mempercepat pemulihan pelayanan bagi konsumen, dengan cara menghubungkan area-area yang tidak terganggu pada penyulang yang bersangkutan, dengan penyulang di sekitarnya.

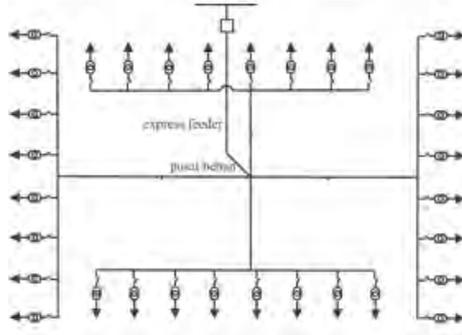
Dengan demikian bagian penyulang yang terganggu dilokalisir, dan bagian penyulang lainnya yang tidak mengalami gangguan segera dapat dioperasikan kembali, dengan cara melepas *switch* yang terhubung ke titik gangguan, dan menghubungkan bagian penyulang yang tidak mengalami gangguan ke penyulang di sekitarnya.



Gambar 2.2 Jaringan radial dengan *tie* dan *switch*

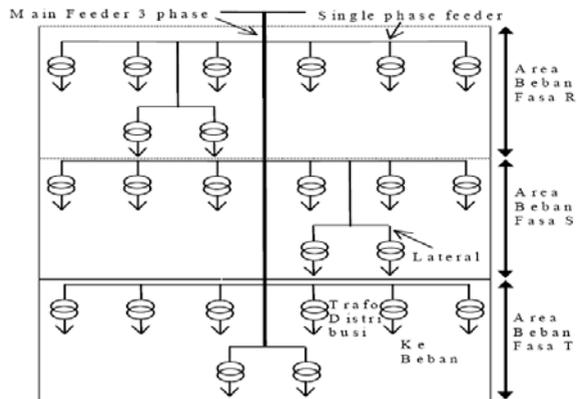
Jaringan radial tipe pusat beban pada gambar 2.3, Bentuk ini mencatu daya dengan menggunakan penyulang utama (*main feeder*)

yang disebut *express feeder* langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini disebar dengan menggunakan *back feeder* secara radial.



Gambar 2.3 Jaringan radial tipe pusat beban

Pada jaringan radial dengan *phase area* seperti gambar 2.4, bentuk ini masing-masing fasa dari jaringan bertugas melayani daerah beban yang berlainan. Bentuk ini akan dapat menimbulkan akibat kondisi sistem 3 fasa yang tidak seimbang (simetris), bila digunakan pada daerah beban yang baru dan belum mantap pembagian bebannya. Karenanya hanya cocok untuk daerah beban yang stabil dan penambahan maupun pembagian bebannya dapat diatur merata dan simetris pada setiap fasanya.



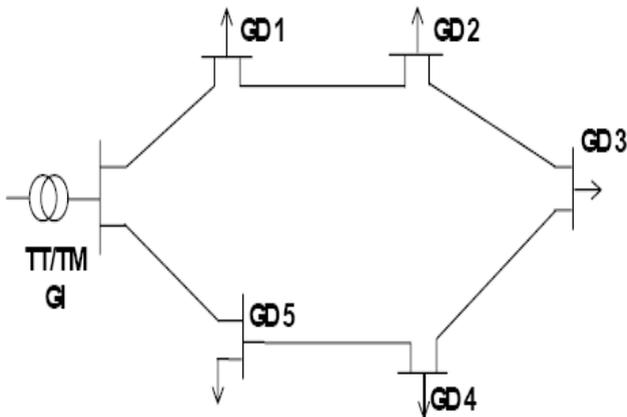
Gambar 2.4 Jaringan radial tipe *phase area*

2.2.2 Sistem Distribusi Loop

Sistem distribusi *loop* ditunjukkan pada gambar 2.5. Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan loop. Susunan rangkaian penyulang membentuk loop, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.

Bentuk *loop* ini ada 2 macam, yaitu:

1. Bentuk *open loop* :
Bila diperlengkapi dengan *normally-open switch*, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.
2. Bentuk *close loop* :
Bila diperlengkapi dengan *normally-close switch*, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

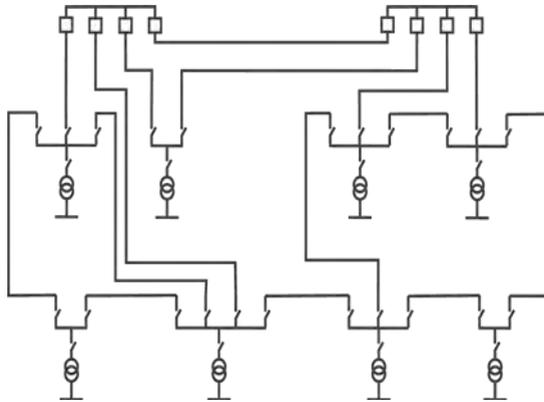


Gambar 2.5 Sistem distribusi tipe *loop*

2.2.3 Jaringan Distribusi Jaring-Jaring (NET)

Jaringan distribusi jaring-jaring pada gambar 2.5 merupakan gabungan dari beberapa saluran distribusi tipe *loop*, dimana pada sistem terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Jaringan ini

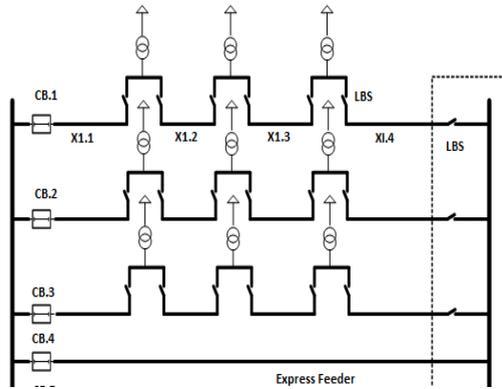
mempunyai bentuk seperti jaring-jaring, kombinasi antara radial dan loop. Titik beban memiliki lebih banyak alternatif saluran/penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera penyulang yang lain dapat menggantikan. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin.



Gambar 2.6 Jaringan distribusi *net*

2.2.4 Jaringan Distribusi Spindle

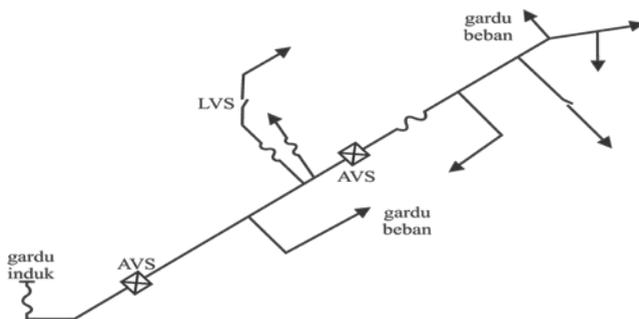
Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada, maka dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi, yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang populer adalah bentuk spindle, yang biasanya terdiri atas maksimum 6 pe nyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Perhatikan gambar 2.6. Saluran dengan beberapa penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan *working feeder* atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan *express feeder*. Fungsi *express feeder* dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu *working feeder*, juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Dalam keadaan normal *express feeder* ini sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu diingat di sini, bahwa bentuk-bentuk jaringan beserta modifikasinya seperti yang telah diuraikan di muka, terutama dikembangkan pada sistem jaringan arus bolak-balik (AC).



Gambar 2.7 Jaringan distribusi *spindle*

2.2.5 Saluran Radial Interkoneksi

Saluran Radial Interkoneksi terdiri lebih dari satu saluran radial tunggal dan saluran radial interkoneksi dilengkapi dengan LBS/AVS sebagai saklar interkoneksi. Masing-masing tipe saluran tersebut memiliki spesifikasi sendiri. Pada dasarnya semua beban yang memerlukan tenaga listrik, membutuhkan pelayanan yang terbaik, misalnya dalam hal stabilitas dan kualitas tegangannya, sebab seperti telah dijelaskan, bila tegangan menjadi *drop* dan tidak stabil, maka peralatan listrik yang digunakan tidak dapat beroperasi secara normal dan bahkan bisa mengalami kerusakan sehingga peralatan tidak bisa digunakan lagi.



Gambar 2.8 Diagram satu garis Penyulang Radial Interkoneksi

2.3 Analisa Aliran Daya [2]

Analisa aliran daya atau *load flow analysis* merupakan sebuah studi dasar untuk melakukan analisa pada sistem tenaga listrik. Aliran daya adalah proses penyaluran daya aktif dan reaktif dari sumber menuju ke beban melalui media penghantar. Media penghantar seperti kabel memiliki nilai impedansi yang akan mempengaruhi daya yang dihantarkan seperti drop tegangan.

Tujuan dari analisa daya adalah :

1. Mengetahui nilai tegangan pada setiap bus
2. Mengetahui nilai daya aktif dan reaktif pada saluran
3. Mengetahui nilai arus yang mengalir pada saluran
4. Mengetahui nilai rugi - rugi tegangan atau *losses* pada saluran
5. Mengetahui nilai drop tegangan

Untuk mendapatkan nilai tegangan pada setiap bus diperlukan data saluran dan data bus. Data saluran ini terdiri dari nilai resistansi dan reaktansi penghantar serta panjangnya. Sedangkan data bus terdiri dari nilai daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran.

Nilai pada data saluran digunakan untuk pertimbangan untuk menghitung *drop* tegangan yang melewati saluran tersebut. Semua data saluran dan data bus diproses untuk memperoleh nilai tegangan pada setiap bus sesuai dengan nilai toleransi yang diinginkan. Proses iterasi analisa aliran daya yang umum digunakan ada tiga yaitu Newton Raphson, Gauss Seidel dan Fast Decoupled.

2.4 Geographic Information System (GIS)

Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System* disingkat GIS) adalah sistem informasi khusus yang mengelola data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan). Atau dalam arti yang lebih sempit, adalah sistem komputer yang memiliki kemampuan untuk membangun, menyimpan, mengelola dan menampilkan informasi bereferensi geografis, misalnya data yang diidentifikasi menurut lokasinya, dalam sebuah database. Pada prinsipnya terdapat dua jenis data untuk mendukung GIS yaitu :

- Data Spasial

Data spasial adalah gambaran nyata suatu wilayah yang terdapat di permukaan bumi. Umumnya direpresentasikan berupa grafik, peta, gambar dengan format digital dan disimpan dalam bentuk koordinat x,y (vektor) atau dalam bentuk *image* yang memiliki nilai tertentu.

- Data Non Spasial (Atribut)

Data non spasial adalah data berbentuk tabel dimana tabel tersebut berisi informasi - informasi yang dimiliki oleh obyek dalam data spasial. Data tersebut berbentuk data tabular yang saling terintegrasi dengan data spasial yang ada.

2.5 Monitoring Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang kompleks memiliki puluhan sampai ratusan titik bus. Monitoring perlu dilakukan untuk memantau dan menjaga aliran daya tetap sesuai dengan yang diinginkan. Oleh karena itu pada setiap titik bus akan dipasang agar mengetahui parameter aliran daya pada setiap saluran dan bus.

2.5.1 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)

Supervisory control and data acquisition atau biasa disingkat SCADA adalah sebuah sistem yang bertujuan untuk mengumpulkan informasi atau data dari lapangan kemudian mengirimkan data tersebut ke komputer pusat yang akan mengatur dan mengolah data - data tersebut. Pada dasarnya sebuah sistem SCADA mempunyai 4 fungsi utama yaitu sebagai berikut :

1. *Telemetry* (TM)
Telemetry adalah proses yang digunakan untuk mendapatkan data Data dikumpulkan menggunakan kabel, sinyal radio dan peralatan yang memiliki fungsi yang sama. Data merupakan hasil pengukuran dari alat ukur yang dipasang pada suatu peralatan. Data tersebut Seperti pengukuran tegangan, arus, daya, faktor daya, dll.
2. *Telesignal* (TS)
Telesignal adalah proses untuk mendapatkan informasi keadaan suatu peralatan tertentu dengan cara mendeteksi nilai dari suatu sensor.
3. *Telecontrol* (TC)
Telecontrol adalah kegiatan yang memiliki kendali secara remote pada sistem tenaga listrik atau dilakukan kontrol jarak jauh pada sistem tenaga listrik.
4. *Data Communication*
Data Communication adalah data yang berasal dari peralatan perlu dikumpulkan pada suatu komputer terpusat. Sinyal yang dihasilkan sensor dan relai kontrol tidak bisa langsung

diterjemahkan oleh protokol komunikasi. Oleh sebab itu dibutuhkan *Remote Terminal Unit* (RTU) yang menjembatani antara sensor dan jaringan SCADA

2.5.2 Bagian Sistem SCADA

SCADA digunakan untuk monitoring membutuhkan alat penunjang dalam operasinya. Berikut alat penunjang yang dibutuhkan :

- a. Sensor dan aktuator (*field device*)
Sensor atau relay hubung yang langsung terhubung ke peralatan. Bagian ini akan mengirimkan data ke *Remote Terminal Unit* (RTU)
- b. *Remote Terminal Unit* (RTU)
Sebuah unit yang memiliki sistem sendiri digunakan untuk mengontrol suatu sistem dari jarak jauh. Peralatan RTU yang umum digunakan adalah *Distributed Control System* (DCS) atau *Programmable Logic Control* (PLC). Peralatan ini berguna sebagai pengendali utama (processor) agar sistem dapat berjalan sesuai yang diinginkan. Biasanya ditempatkan pada tempat tertentu di lapangan atau dekat dengan *plant*.
- c. Sistem komunikasi
Dalam sistem SCADA dibutuhkan peralatan komunikasi yang berfungsi menghubungkan peralatan yang ada di lapangan, RTU dan MTU. Komunikasi pada sistem SCADA bermacam-macam, seperti jaringan kabel, jaringan radio, jaringan telepon, dan yang sering digunakan adalah RJ-45 atau Fiber Optik.
- d. *Master Terminal Unit* (MTU)
MTU merupakan komputer yang digunakan untuk pengolahan data pusat dari sistem SCADA. MTU mempunyai *Human Machine Interface* (HMI) yang memiliki fungsi tampilan untuk memudahkan operator dalam memonitoring dan mengontrol *plant*.

SCADA memiliki beberapa konfigurasi yang dapat digunakan. Berikut konfigurasi dari SCADA:

- a. *Point to point*
Point to point merupakan konfigurasi paling sederhana yang terdiri dari satu unit *master station* dan satu unit *remote station*.

- b. *Point to multipoint*
Konfigurasi SCADA ini terdiri dari beberapa unit *remote station* dan memiliki satu unit *master station*. *Master station* dapat menerima atau mengirim informasi secara bersamaan pada beberapa *remote station*. Masing-masing *remote station* memiliki *interface* yang berbeda-beda.
- c. *Multipoint*
Multipoint merupakan konfigurasi yang terdiri dari beberapa *remote station* dan terhubung ke *master station* yang memiliki *interface* sama. Sehingga hanya ada satu *remote station* yang dapat mengirimkan data ke *master station* dalam satu waktu. Namun *master station* dapat mengirimkan data ke beberapa *remote station* secara bersamaan dalam satu waktu.
- d. *Partyline*
Tiap *remote station* terhubung ke *master station* dalam satu bus. Pengiriman datanya sama seperti *multipoint* yaitu hanya ada satu *remote station* yang dapat mengirimkan data ke *master station* dalam satu waktu.
- e. *Loop*
Setiap *remote station* berkomunikasi dengan *master station* melalui dua arah. Oleh karena itu konfigurasi ini paling handal.
- f. Konfigurasi gabungan
Konfigurasi gabungan adalah gabungan dari konfigurasi yang disebutkan di atas.

2.6 Phasor Measurement Unit (PMU) [3]

Phasor Measurement Unit (PMU) adalah suatu peralatan yang digunakan untuk tujuan monitoring. Pemasangan PMU pada sistem kelistrikan mampu memonitoring secara *real time* dan selaras antara PMU satu dengan lainnya. Dengan pemasangan PMU membuat dua parameter dapat diketahui yaitu :

- Tegangan : sudut dan magnitude tegangan pada bus
- Arus : sudut dan magnitude pada saluran transmisi

PMU menggunakan sinyal satelit GPS untuk meyamakan waktu sampling antar PMU sehingga fasor tegangan dan arus dapat diukur secara terus – menerus. PMU juga memiliki keuntungan yang lain seperti mengukur sistem proteksi, frekuensi lokal / b isa dikombinasi

dengan pengukuran harmonisa, arus urutan nol dan urutan negatif seperti pengukuran tegangan dan arus pada umumnya.

2.7 Optimasi Menggunakan Binary Integer Linear Programming (BILP) [4]

Binary Integer Linear Programming (BILP) adalah suatu program atau metode yang digunakan untuk mendapatkan solusi dari permasalahan dengan mengolah data biner. Solusi yang didapat dari BILP adalah suatu vektor yang bernilai biner, yaitu 0 atau 1, yang akan memberikan nilai minimum untuk suatu fungsi atau persamaan linier dengan batasan yang linier. BILP akan digunakan untuk meminimalkan jumlah dari sensor yang dipasang pada bus. Maka optimasi tersebut dapat di rumuskan dengan persamaan berikut:

$$t_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{jika } i = k \\ 1, & \text{jika } i \text{ dan } k \text{ terhubung} \\ 0, & \text{untuk keadaan lain} \end{cases}$$

Penempatan optimal sensor PMU dengan menggunakan BILP dapat di rumuskan seperti persamaan berikut:

$$\min \sum_{k=1}^N X_k \quad (2.1)$$

$$T_{pmu} X \geq b_{pmu} \quad (2.2)$$

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (2.3)$$

$$b_{pmu} \in \{0,1\} \quad (2.4)$$

Keterangan:

T_{PMU} : Matrix hubungan antar bus

b_{PMU} : Batasan letak sensor berdasarkan topologi

X : Jumlah dan letak sensor yang terpasang di bus

2.8 State Estimation [5,6]

Metode *State estimation* merupakan sebuah proses untuk menentukan sebuah variabel yang tidak diketahui berdasarkan pengukuran dari sistem. Pada sistem tenaga variabelnya adalah magnitude tegangan. Data yang diperlukan untuk analisa *state estimation* antara lain ialah data bus dan data saluran. Untuk data bus berupa data daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada bus, sedangkan data saluran berupa data resistansi dan reaktansi antar saluran

bus. Dari data-data tersebut diproses dengan metode *state estimation* untuk mendapatkan nilai variabel tegangan. Dengan metode *state estimation* kita dapat memperbaiki kesalahan atau error pengukuran yang terjadi agar diperoleh nilai variabel tegangan yang lebih akurat dan dapat mengurangi alat pengukuran sehingga dapat menekan biaya.

2.8.1 Weighted Least Square (WLS) [6,7]

Weighted Least Square (WLS) merupakan suatu metode konvensional dari *state estimation* yang sering digunakan dalam melakukan estimasi suatu keadaan. Estimasi yang dilakukan dari data bus yang terdapat sensor pengukuran. Data pengukuran yang didapatkan adalah daya injeksi, aliran daya saluran, arus dan tegangan magnitude. Tegangan magnitude dan sudut f asa bus adalah variabel yang diestimasi. Berikut langkah-langkah prosesnya.

Sebelum melakukan iterasi WLS diperlukan inisialisasi variabel dan *input* data yang harus didefinisikan, yaitu :

1. Magnitude tegangan semua bus untuk pertama kali didefinisikan bernilai 1 pu dan sudutnya 0° .
2. Data impedansi pada saluran berasal dari data existing plan sistem distribusi. Nilai impedansi berupa resistansi (R) dan reaktansi (X).
3. Daya yang terbaca dari hasil alat pengukuran adalah daya aktif dan daya reaktif. Daya ini dibagi menjadi dua yaitu daya injeksi pada bus ($PQ_{injection}$) dan daya yang mengalir pada saluran (PQ_{flow}).
4. Toleransi error dari masing-masing alat pengukuran (R). Nilai ini diasumsikan 10^{-4} untuk pengukuran daya injeksi pada bus dan 6.4×10^{-5}

Untuk membentuk data impedansi (Z) dapat dilihat pada persamaan 2.5 dan membentuk data admitansi (Y) pada persamaan 2.6 seperti berikut :

$$Z = R + jX \quad (2.5)$$

Keterangan:

R = resistansi saluran

X = reaktansi

Kemudian data admitansi (Y) dapat dibentuk dari data admitansi di atas seperti berikut :

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} \quad ; \quad Y = G + jB \quad (2.6)$$

Keterangan:

G = konduktansi

B = suseptansi

Data admintasi ini akan digunakan untuk membentuk matriks admitansi (Y_{bus}) pada persamaan 2.7 dengan besar n baris dan kolom. Dimana n adalah jumlah bus yang saling terhubung.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \dots & \dots & \dots & Y_{2n} \\ Y_{31} & \dots & \dots & \dots & Y_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Nilai untuk mengisi persamaan Y_{bus} dapat membentuk persamaan 2.8 di bawah ini

$$Y_{ij} = \begin{cases} Y_{ij} + \sum_{i \neq j} Y_{ij} & \text{untuk } i = j \\ -Y_{ij} & \text{untuk } i \neq j \end{cases} \quad (2.8)$$

Salah satu komponen matriks seperti Y_{12} digunakan untuk mengisi nilai admitansi pada persamaan Y_{bus} . Variabel tersebut maksudnya adalah nilai admitansi pada saluran 1-2. Pada komponen matriks dengan baris dan kolom yang sama seperti Y_{11} , Y_{12} hingga Y_{nn} disebut sebagai *self admittance* . Setelah semua data awal didefinisikan, selanjutnya masuk pada proses iterasi WLS. Iterasi ini bertujuan untuk mencari selisih tegangan (ΔV) sesuai toleransi yang diinginkan antara iterasi sekarang dan iterasi sebelumnya.

Data lain yang dibutuhkan adalah data impedansi (Z) dan toleransi pengukuran (R) disusun menjadi matriks 1 kolom seperti pada persamaan 2.9 dan 2.10 Matriks berisi data dari pengukuran tegangan pada bus utama, daya injeksi dan aliran daya pada saluran.. Berikut persamaan matriks:

$$Z = \begin{bmatrix} V_{mag} \\ P_{inj} \\ Q_{inj} \\ P_{flow} \\ Q_{flow} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$R = \begin{bmatrix} RV_{mag} \\ RP_{inj} \\ RQ_{inj} \\ RP_{flow} \\ RQ_{flow} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Selanjutnya adalah iterasi WLS. Pada iterasi pertama membentuk matriks h seperti persamaan 2.11, yakni matrik fungsi *nonlinier* dari data pengukuran. Matrik ini dibentuk dari lima komponen utama dari data pengukuran itu sendiri.

$$h = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Komponen dari matriks h adalah h_1 , h_2 , h_3 , h_4 dan h_5 yang ditunjukkan pada persamaan 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16.

$$h_1 = V_{mag_i} = 1 \quad (2.12)$$

$$h_2 = P_{inj_i} = \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)) \quad (2.13)$$

$$h_3 = Q_{inj_i} = \sum_{k=1}^N |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)) \quad (2.14)$$

$$h_4 = Pflow_{ik} = |V_i||V_k|(G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)) - |V_i||V_k| G_{ik} \quad (2.15)$$

$$h_5 = Qflow_{ik} = |V_i||V_k|(G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)) + |V_i||V_k| B_{ik} \quad (2.16)$$

Keterangan :

V_{mag_i}	=	magnitudo tegangan bus utama
$Pinj_i$	=	injeksi daya aktif bus i
$Qinj_i$	=	injeksi daya reaktif bus i
$Pflow_{ik}$	=	aliran daya aktif dari bus i menuju bus k
$Qflow_{ik}$	=	aliran daya reaktif dari bus i menuju bus k
N	=	jumlah bus
G_{ik}	=	konduktansi antara bus i dan bus k
B_{ik}	=	suseptansi antara bus i dan bus k
V_i	=	magnitudo tegangan pada bus i
θ_i	=	sudut tegangan pada bus i
V_k	=	magnitudo tegangan pada bus k
θ_k	=	sudut tegangan pada bus k

Matriks h ini digunakan untuk mencari nilai residu dengan pengukuran data impedansi asli seperti pada persamaan 2.17 berikut:

$$r = z - h \quad (2.17)$$

Variabel lain yang dibutuhkan dalam proses iterasi WLS adalah matriks Jacobian (H) seperti ditunjukkan pada persamaan 2.18. Matriks jacobian merupakan matriks semua turunan parsial orde pertama dari fungsi vektor. Matriks Jacobian yang digunakan berasal dari jenis data pengukuran yang kemudian diturunkan berdasarkan tegangan dan sudut.

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Matriks Jacobian digunakan untuk mendapatkan gain matriks dengan cara merubah matriks ke dalam bentuk transposenya dan dikalikan matriks Jacobian itu sendiri. Kemudian dibagi dengan error dari alat pengukuran. Berikut persamaan 2.19 dari gain matriks:

$$G = H^T \cdot R^{-1} \cdot H \quad (2.19)$$

Dengan gain matriks ini selisih tegangan dapat dicari. Selisih tegangan (ΔE) didapatkan dari hasil perkalian dari transpose matriks jacobian dengan *residual* pengukuran (r) dan membaginya dengan gain matriks dan nilai toleransi error dari alat p engukuran. Berikut persamaan 2.20.

$$\Delta E = G^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \cdot r \quad (2.20)$$

Apabila terjadi *drop* tegangan, nilai selisih tegangan akan bernilai negatif. Sehingga penjumlahan dari tegangan awal yang dianggap 1 pu dengan tegangan selisih yang bernilai negative akan didapat tegangan baru yang nilainya lebih kecil dari 1 pu Selisih tegangan ini kemudian ditambahkan dengan nilai magnitude tegangan awal. Berikut persamaan 2.21 yang menunjukkan selisih tegangan :

$$E = E + \Delta E \quad (2.21)$$

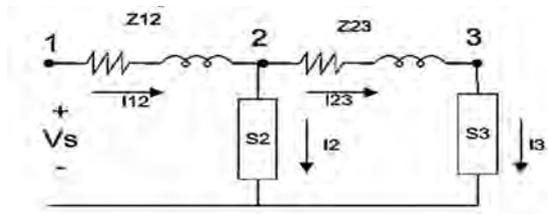
2.8.2 Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE) [8]

Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE) merupakan metode dari pengembangan metode state estimation sebelumnya yaitu *Weighted Least Square* (WLS). BC-DSSE

menggunakan arus cabang sebagai *state variable*-nya. BC-DSSE menentukan nilai tegangan dengan menggunakan rumus aliran daya seperti metode forward-backward. Kemudian matrix impedansi saluran dicari. BC-DSSE sendiri mempunyai dua tipe yaitu :

- Pengukuran secara tradisional , dimana pengukurannya terdapat amplitudo tegangan dengan amplitudo arus.
- Pengukuran yang sinkron, dimana amplitudo fasa dan sudut dari tegangan dan arus diukur oleh PMU

Berikut contoh soal pada gambar 2.9 untuk menyelesaikan proses penentuan tegangan secara umum.



Gambar 2.9 Contoh rangkaian ekuivalen

Keterangan :

Z_{12} = Impedansi dengan nilai $0,157 + j0,376 \Omega$

Z_{23} = Impedansi dengan nilai $0,2745 + j0,357\Omega$

S_2 = Daya beban dengan nilai $1600 kW + j850 KVAR$

S_3 = Daya beban dengan nilai $950 kW + j600 KVAR$

$V_s = 7300 V$

Dengan mengasumsikan arus seperti persamaan 2.22 sehingga didapat nilai teganganya seperti persamaan 2.23 dan pada persamaan 2.24 merupakan hukum kirchoff.

$$I_3 = \left(\frac{S_3}{V_3} \right)^* ; I_{23} = I_3 \quad (2.22)$$

$$V_2 = V_3 + Z_{23} * I_{23} \quad (2.23)$$

$$I_{12} = I_3 + I_2 \quad (2.24)$$

Berikut langkah penyelesaian berdasarkan contoh soal rangkaian yang ada pada gambar 2.9.

- a. Langkah pertama adalah menghitung arus yang mengalir pada tiap cabang, dengan asumsi awak tegangan diujung titik paralel adalah sama dengan tegangan sumber ($V_3 = 7300 \angle 0^\circ$)

$$I_3 = \left(\frac{S_3}{V_3} \right)^*$$

$$I_3 = \left(\frac{(950 + j600) * 1000}{7300 \angle 0^\circ} \right)^*$$

$$I_3 = 130,138 + j82,19$$

$$I_3 = (153,92 \angle 32,275^\circ)^*$$

$$I_3 = 154 \angle -32,275^\circ$$

- b. Karena I_3 mengalir pada cabang paralel paling ujung, maka nilainya sama dengan I_{23} , kemudian V_2 dicari.

$$I_3 = I_{23}$$

$$V_2 = V_3 + Z_{23} * I_{23}$$

$$V_2 = 7300 \angle 0^\circ + (0,2745 + j0,357) * 154 \angle -32,275^\circ$$

$$V_2 = 7365,05 + j23,89$$

$$V_2 = 7365,088 \angle 0,186^\circ$$

- c. Kemudian menghitung arus beban (I_2) pada *node* 2

$$I_2 = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^*$$

$$I_2 = \left(\frac{(1600 + j850) * 1000}{7365,088 \angle 0,186^\circ} \right)^*$$

$$I_2 = 217,615 + j114,7$$

$$I_2 = (245,99 \angle 27,79^\circ)^*$$

$$I_2 = 245 \angle -27,79^\circ$$

- d. Menentukan I_{12}

$$I_{12} = I_3 + I_2$$

$$I_{12} = 154 \angle -32,275^\circ + 245 \angle -27,79^\circ$$

$$I_{12} = 346,94 - 196,463j$$

$$I_{12} = 398,7 \angle -29,52^\circ$$

e. Menentukan V_1 di *node* 1

$$V_1 = V_2 + Z_{12} * I_{12}$$

$$V_1 = 7365,088 \angle 0,186^\circ + (0,157 + j0,376) * 398,7 \angle -29,52^\circ$$

$$V_1 = 7490,119 + j122,85$$

$$V_1 = 7491,13 \angle 0,94^\circ$$

f. Error dihitung

$$Error = ||V_1| - |V_s| |$$

$$Error = ||7491,13 \angle 0,94^\circ| - |7300 \angle 0^\circ| |$$

$$Error = 191,13$$

Dengan toleransi error $1e^{-4}$

g. Proses *backward*

$$V_2 = V_s - Z_{12} * I_{12}$$

$$V_2 = 7300 \angle 0^\circ + (0,157 + j0,376) * 398,7 \angle -29,52^\circ$$

$$V_2 = 7174,93 - j98,95$$

$$V_2 = 7175,6 \angle -0,79^\circ$$

h. Menentukan V_3

$$V_3 = V_2 - Z_{23} * I_{23}$$

$$V_3 = 7175,6 \angle -0,79^\circ - (0,2745 + j0,357) * 154 \angle -32,275^\circ$$

$$V_3 = 7109,85 - j122,82$$

$$V_3 = 7110,91 \angle -0,99^\circ$$

Kemudian ulangi langkah a dan hitung I_3 menggunakan *update* V_3 ke dalam persamaan $I_3 = \left(\frac{S_3}{V_3}\right)^*$ dan ulangi sampai mencapai toleransi error $1e^{-4}$ atau sesuai dengan toleransi error yang diinginkan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

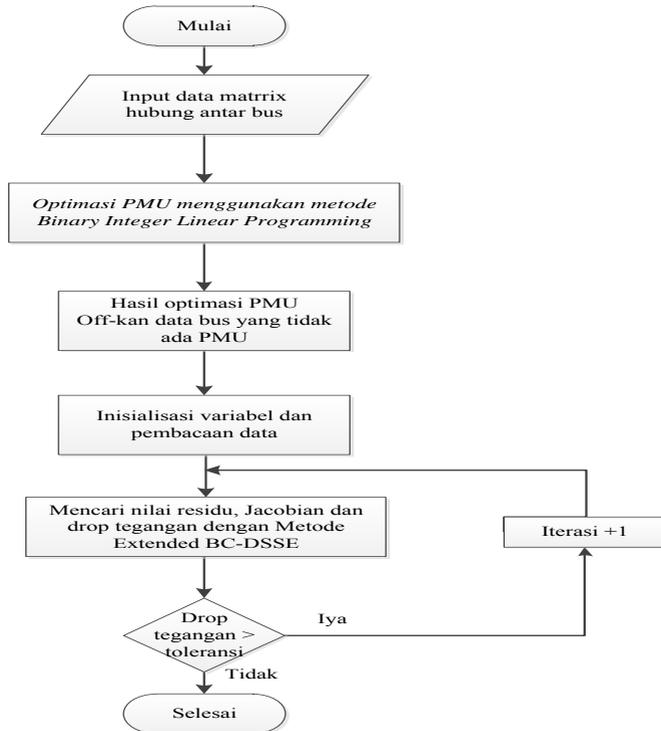
BAB III

SISTEM DISTRIBUSI 20 KV DI SURABAYA

3.1 Sistem Distribusi 20 KV Di Surabaya

Kota Surabaya memiliki tingkat konsumsi listrik yang cukup tinggi karena memiliki jumlah penduduk yang banyak. Suplai daya listrik Surabaya ditangani oleh PLN yang merupakan milik pemerintah Indonesia. Sistem distribusi di kota Surabaya menggunakan jaringan distribusi radial tiga fasa. Namun dalam Tugas Akhir ini jaringan dianggap tiga fasa seimbang sehingga diasumsikan satu fasa.

Pada bab ini akan membahas mengenai perencanaan sistem. Berikut langkah – langkah dalam perencanaan sistem dan perancangan program secara keseluruhan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart sistem keseluruhan

Pada sistem distribusi 20 KV Surabaya dalam Tugas Akhir ini menggunakan salah satu penyulang (*feeder*) yaitu penyulang Nginden yang merupakan penyulang dari gardu induk Sukulilo. Dimana penyulang Nginden mempunyai 39 bus. Data penyulang Nginden yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut. Pada tabel 3.1 adalah data dari panjang saluran udara pada penyulang berdasarkan data yang ada pada *Geographic Information System (GIS)*.

Tabel 3.1 Data panjang saluran udara penyulang Nginden

Dari Bus	Ke Bus	L (km)
1	2	0,41937
1	5	0,4772
1	6	0,68936
1	7	0,76735
2	3	0,09749
3	4	0,03859
7	8	0,3429
7	14	0,64557
7	16	0,60479
8	9	0,16497
8	11	0,25126
9	10	0,08186
11	12	0,02296
12	13	0,02597
14	15	0,09988
16	17	0,1106
17	18	0,1304
18	19	0,13554
18	20	0,28868
20	21	0,18236
21	22	0,03281
22	23	0,08422
23	24	0,11048

Dari Bus	Ke Bus	L (km)
23	30	0,22181
23	31	0,19964
24	25	0,28213
24	28	0,40892
24	29	0,46605
25	26	0,15583
26	27	0,186
31	32	0,03333
32	33	0,11381
32	35	0,22118
33	34	0,29196
35	36	0,14094
35	37	0,19642
35	38	0,06914
38	39	0,09859

Dengan nilai $R = 0,265/\text{Km}$ dan nilai $X = 0,13/\text{Km}$ maka didapatkan nilai impedansi dengan cara mengalikan nilai R dan nilai X dengan panjang saluran antar bus. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data impedansi saluran penyulang Nginden

Saluran		Impedansi	
Dari Bus	Ke Bus	R (ohm)	X (ohm)
1	2	0,11113305	0,0545181
1	5	0,126458	0,062036
1	6	0,1826804	0,0896168
1	7	0,20334775	0,0997555
2	3	0,02583485	0,0126737
3	4	0,01022635	0,0050167
7	8	0,0908685	0,044577
7	14	0,17107605	0,0839241

Saluran		Impedansi	
Dari Bus	Ke Bus	R (ohm)	X (ohm)
7	16	0,16026935	0,0786227
8	9	0,04371705	0,0214461
8	11	0,0665839	0,0326638
9	10	0,0216929	0,0106418
11	12	0,0060844	0,0029848
12	13	0,00688205	0,003761
14	15	0,0264682	0,0129844
16	17	0,029309	0,014378
17	18	0,034556	0,016952
18	19	0,0359181	0,0176202
18	20	0,0765002	0,0375284
20	21	0,0483254	0,0237068
21	22	0,00869465	0,0042653
22	23	0,0223183	0,0109486
23	24	0,0292772	0,0143624
23	30	0,05877965	0,0288353
23	31	0,0529046	0,0259532
24	25	0,0746445	0,0366769
24	28	0,1083638	0,0531596
24	29	0,12350325	0,0605865
25	26	0,04129495	0,0202579
26	27	0,04929	0,02418
31	32	0,00883245	0,0043329
32	33	0,03015965	0,0147953
32	35	0,0586127	0,0287534
33	34	0,0773694	0,0379548
35	36	0,0373491	0,0183222
35	37	0,0520513	0,0255346
35	38	0,0183221	0,0089882
38	39	0,02612635	0,0128167

Sedangkan data beban pada penyulang Nginden ditunjukkan dalam tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data beban penyulang Nginden

No Bus	P(KW)	Q(KVAR)
1	0	0
2	20	4
3	34	9
4	34	9
5	99	17
6	79	14
7	45	8
8	89	15
9	64	11
10	45	8
11	89	15
12	45	8
13	45	8
14	94	16
15	89	15
16	45	8
17	69	12
18	94	16
19	69	12
20	59	10
21	69	12
22	15	2
23	74	13
24	74	13
25	84	15
26	59	10
27	79	14
28	69	12
29	79	14

No Bus	P(KW)	Q(KVAR)
30	20	3
31	74	13
32	15	2
33	69	12
34	74	13
35	94	16
36	84	15
37	59	10
38	64	11
39	45	8

Pada *Geographic Information System* (GIS), tiap dibus diwakili gardu yang memiliki kode. Berikut keterangan lebih lengkapnya pada tabel 3.4.

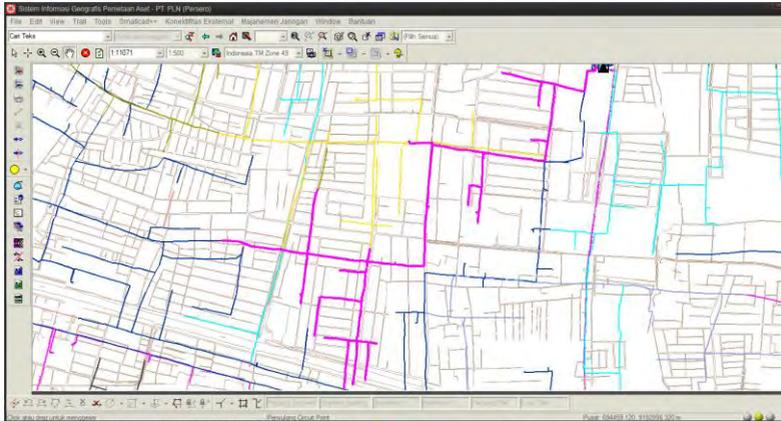
Tabel 3.4 Nomer gardu pada GIS penyulang Nginden

No Bus	No Gardu
1	SUKOLILO
2	BD796
3	BD715
4	BD748
5	BD620
6	BD567
7	BD564
8	BD156
9	BD157
10	BD158
11	BD159
12	BD160
13	BD493
14	BD221

No Bus	No Gardu
15	BD696
16	BD162
17	BD919
18	BD163
19	BD844
20	BD164
21	BD165
22	BD849
23	BD166
24	BD716
25	BD176
26	BD177
27	BD178
28	BD175
29	BD645
30	BD727
31	BD167
32	BD828
33	BD168
34	BD169
35	BD170
36	BD172
37	BD171
38	BD173
39	BD174

3.2 Geographic Information System Pada Sistem Distribusi (GIS)

Berdasarkan GIS, kita dapat memonitoring jaringan distribusi. Salah satunya adalah Gardu Induk Sukolilo dengan penyulang Nginden. Untuk lokasi dari penyulang Nginden berdasarkan GIS dapat dilihat pada gambar 3.2 yang berwarna merah muda menyolok.



Gambar 3.2 Lokasi penyulang Nginden pada GIS

Berikut contoh trafo di GIS pada gambar 3.3 :



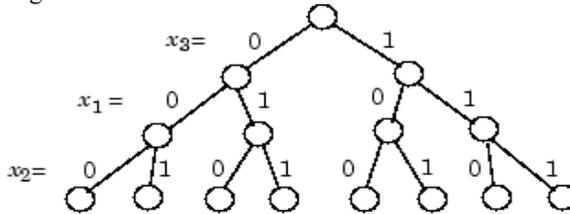
Gambar 3.3 Simbol trafo pada GIS

3.3 Binary Integer Linear Programming (BILP)

Binary Integer Linear Programming (BILP) adalah program atau metode yang digunakan untuk mendapatkan solusi dari permasalahan. Solusi yang didapat dari BIP adalah suatu vektor yang bernilai biner, yaitu 1 atau 0. BILP mengacu pada konsep branch and bound.

Algoritma *branching* atau percabangan ini akan melakukan proses pencarian dalam bentuk *tree* (pohon atau cabang). Pada tahap *branching* ini, algoritma akan memilih variabel x_j dan menambahkan batasan $x_j=0$ untuk satu cabang dan $x_j=1$ untuk cabang lainnya. Proses ini dapat dimisalkan dengan *binary tree* (percabangan biner). Hal ini akan

membagi permasalahan menjadi sub-permasalahan yang lebih kecil seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema percabangan pada BILP

Setelah diperoleh sub-sub permasalahan maka perlu diketahui suatu *bound* atau batasan yang menunjukkan seberapa bagus penyelesaian yang mungkin untuk fungsi tersebut. Seiring dengan bertambahnya cabang pada pencarian dalam *tree*, algoritma ini akan memperbarui batas minimum serta batas maksimum. Batasan ini menjadikan alasan untuk memotong atau tidak meneruskan percabangan yang tidak diperlukan karena memberikan hasil kurang optimal.

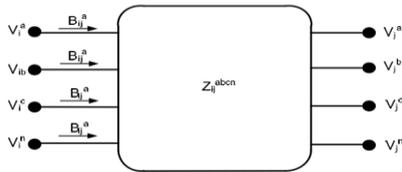
Data untuk program atau metode BILP adalah data matrik yang berdasarkan hubungan antar bus yang terhubung (T_{pmu}) pada penyulang Nginden. Berikut datanya :

Inialisasi penempatan pmu (b_{PMU}) pada penyulang Nginden dapat ditulis sebagai berikut :

$$b_{pmu} = [11111111111111111111111111111111111111]^T$$

3.4 Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE) pada Jaringan Distribusi [8,9]

Branch Current Distribution System State Estimators (BC-DSSE) merupakan pengembangan dari metode WLS. Metode BC-DSSE menggunakan arus cabang untuk mencari nilai dari selisih nilai tegangan referensi dengan *drop* tegangan akibat arus yang melewati impedansi. Nilai arus didapatkan dari nilai tegangan hasil dari *state estimation* metode WLS. Nilai tegangan dari metode WLS kemudian dibagi dengan impedansi saluran dan nilai arus akan diperoleh. Untuk memahaminya perlu diketahui dulu jaringan distribusi yang akan digunakan. Model jaringan distribusi tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.5, tetapi dalam tugas akhir ini jaringan dianggap seimbang sehingga diasumsikan satu fasa:

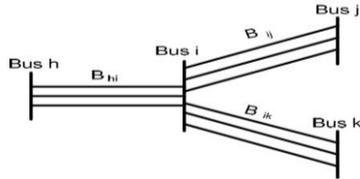


Gambar 3.5 *Three-phase line section*

Gambar 3.5 menunjukkan sebuah *three-phase line section*. Dengan menggunakan metode yang telah dikembangkan Carson-Lewis, nilai-nilai konstantanya dapat diperoleh dan dari gambar tersebut diperoleh matriks pada persamaan 3.1 dengan nilai impedansi sebagai berikut :

$$Z_{abcn} = \begin{bmatrix} Z_{aa,ij} & Z_{ab,ij} & Z_{ac,ij} & Z_{an,ij} \\ Z_{ba,ij} & Z_{bb,ij} & Z_{bc,ij} & Z_{bn,ij} \\ Z_{ca,ij} & Z_{cb,ij} & Z_{cc,ij} & Z_{cn,ij} \\ Z_{na,ij} & Z_{nb,ij} & Z_{nc,ij} & Z_{nn,ij} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Beberapa formulasi yang telah dikembangkan dapat digunakan untuk mengintegrasikan pengukuran tegangan pada formulasi original dan dapat meningkatkan keakuratan dari hasil BC-DSSE.

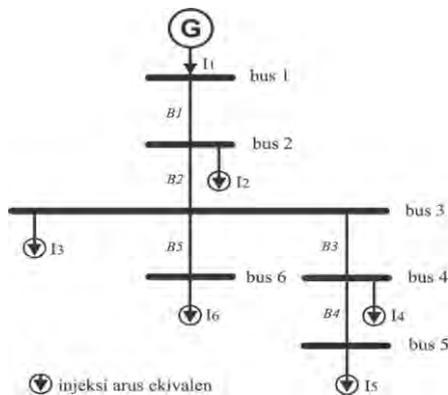


Gambar 3.6 Bagian dari sistem distribusi

Gambar 3.6 menunjukkan bagian dari sistem distribusi, dari gambar 3.6 dapat dilihat bahwa tegangan dari sistem distribusi dapat diungkapkan sebagai matrik impedansi saluran dan arus cabang. Contohnya, tegangan pada bus i, j dan k dapat diungkapkan pada persamaan 3.2 sebagai berikut :

$$\left. \begin{aligned} V_i &= V_h - Z_{hi} B_{hi} \\ V_j &= V_i - Z_{ij} B_{ij} \\ V_k &= V_i - Z_{ik} B_{ik} \end{aligned} \right\} V_k = V_h - Z_{ij} B_{ij} - Z_{ik} B_{ik} \quad (3.2)$$

Berikut contoh penyelesaian dengan jaringan sederhana pada gambar 3.7 :



Gambar 3.7 Jaringan sederhana

Dari Gambar 3.7 kita dapatkan persamaan untuk mencari arus cabang (B). berikut langkah-langkahnya:

$$\begin{aligned}
 B_5 &= I_6 \\
 B_4 &= I_5 \\
 B_3 &= I_4 + I_5 \\
 B_2 &= I_2 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6
 \end{aligned}$$

Kemudian dibentuk persamaan untuk mencari nilai drop tegangan berdasarkan jalur injeksi arusnya.

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \\
 V_3 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \\
 V_4 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \\
 V_5 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \\
 V_6 &= V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{56}
 \end{aligned}$$

Dari matriks dapat ditulis matriks hubungan antara tegangan bus dengan arus cabang, sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

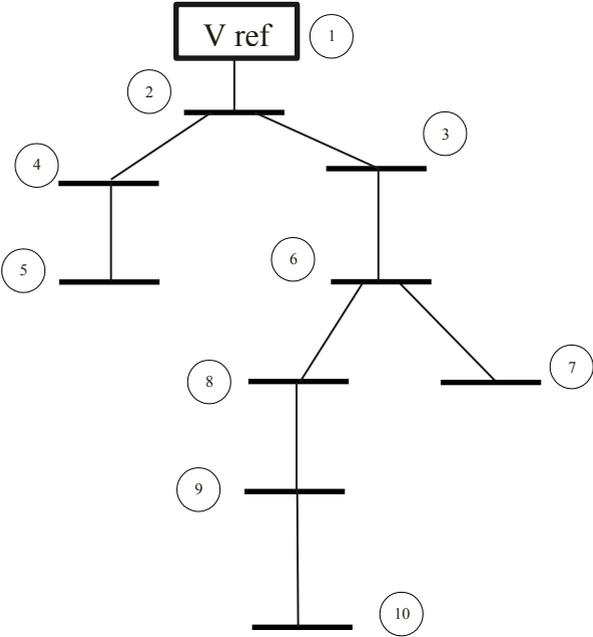
Persamaan umum tegangan bus dapat ditulis dalam persamaan 3.3, sebagai berikut:

$$V_i = V_l - \sum_{l \in \Omega_i} B_l Z_l \quad (3.3)$$

3.5 Extended Branch Current Based State Estimator (Extended BSE) [9,10,11]

Pada BC-DSSE sebelumnya akan diterapkan nilai tegangan referensi baru yang diperoleh dari pengukuran tegangan. Nilai pengukuran ini akan memperbaiki error yang dikarenakan penghilangan

pengukuran pada bus sebelumnya. Pada BC-DSSE, ketidakadaan sensor menyebabkan error pada bus-bus di bawahnya. Dengan adanya pengukuran tegangan pada bus selanjutnya, error tersebut tidak berpengaruh pada bus-bus di bawahnya.



Gambar 3.8 Contoh skema jaringan

Pada gambar 3.8 didapatkan matrik tegangan seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & 0 & Z_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & 0 & Z_{24} & 0 & Z_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{36} & 0 & Z_{67} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{36} & 0 & 0 & Z_{78} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{36} & 0 & 0 & Z_{78} & Z_{89} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & Z_{36} & 0 & 0 & Z_{78} & Z_{89} & Z_{910} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \\ B_9 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya V_6 menjadi V referensi baru yang digunakan untuk mengupdate nilai di bus selanjutnya. Maka persamaan di atas menjadi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_7 \\ V_8 \\ V_9 \\ V_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_6 \\ V_6 \\ V_6 \\ V_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{67} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{68} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{68} & Z_{89} & 0 \\ 0 & Z_{68} & Z_{89} & Z_{910} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} B_7 \\ B_8 \\ B_7 \\ B_{10} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Nilai B merupakan arus cabang yang diperoleh dengan persamaan 3.4:

$$B = I_{branch} = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad (3.5)$$

Nilai S diperoleh dari persamaan berikut

$$S = P + jQ \quad (3.6)$$

BC-DSSE secara tradisional seperti di atas, state vector diperpanjang dengan menambahkan magnitudo tegangan dari *slack bus*. Ketika *slack bus* sudut fasa dipilih sebagai *reference* dan secara konvensional magnitudo diatur menjadi 1 dan sudut diatur menjadi 0. Pada *Extended BC-DSSE*, $V_{reference}$ tidak dibutuhkan ketika menggunakan PMU. PMU akan mengukur magnitudo tegangan dan sudut pada *slack bus*. Kemudian nilai dari magnitudo dan sudut tegangan tersebut dimasukkan dalam perhitungan pada *Extended BC-DSSE*. Maka pada *slack bus* diasumsikan magnitudo tegangan sebesar 0,9999999 pu dan sudut tegangan adalah -0,0000001. Dengan *Extended BC-DSSE* ini, profil tegangan pada jaringan menjadi meningkat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV SIMULASI & ANALISIS

4.1 Peletakkan Optimal PMU

Untuk mencari peletakkan PMU yang optimal digunakan program *Binary Integer Linear Programming* (BILP). Berikut data inisialisasi PMU dari penyulang Nginden :

$$b_{pmu} = [111]^T$$

Berdasarkan Data tersebut dan kemudian melakukan *running* program BILP. Maka didapatkan hasil sebagai berikut :

$$b_{pmu} = [101000001001010011000111010000001010010]$$

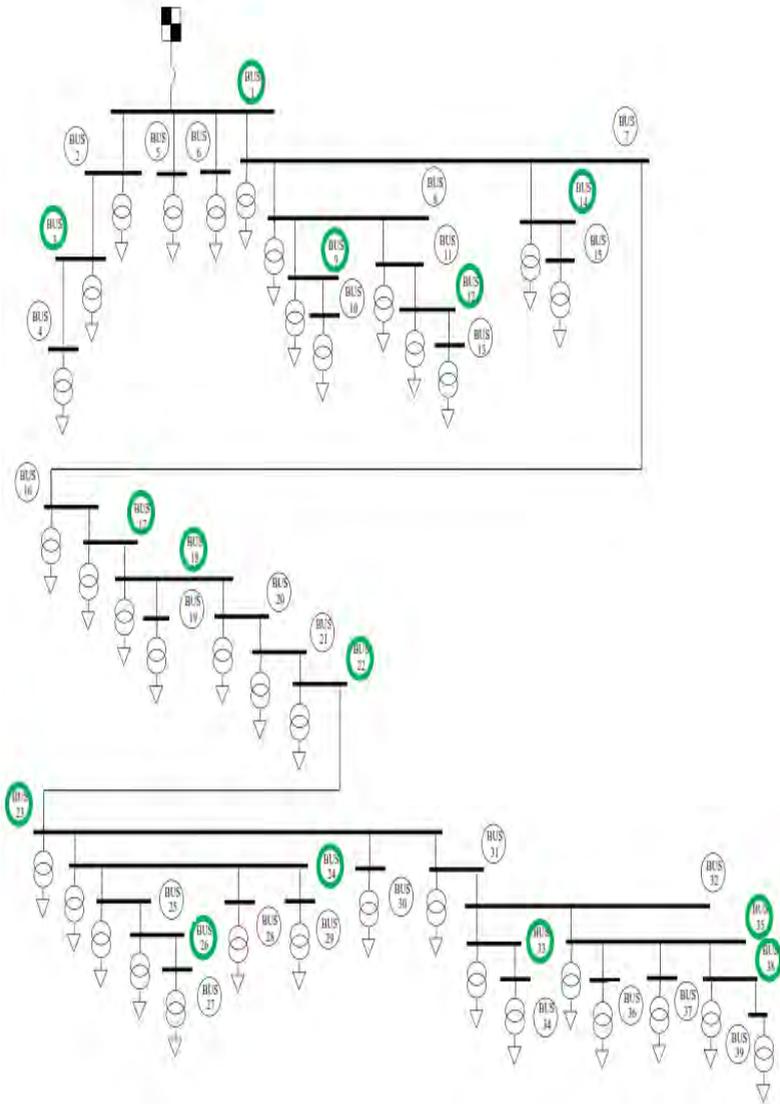
Pada bus 1 wajib terpasang PMU. Maka hasil peletakkan PMU terdapat pada bus atau nomer gardu sebagai berikut :

Tabel 4.1 Peletakkan PMU optimal pada penyulang Nginden

No Bus	No Gardu	PMU
1	SUKOLILO	YES
2	BD796	-
3	BD715	YES
4	BD748	-
5	BD620	-
6	BD567	-
7	BD564	-
8	BD156	-
9	BD157	YES
10	BD158	-
11	BD159	-
12	BD160	YES
13	BD493	-
14	BD221	YES
15	BD696	-

No Bus	No Gardu	PMU
16	BD162	-
17	BD919	YES
18	BD163	YES
19	BD844	-
20	BD164	-
21	BD165	-
22	BD849	YES
23	BD166	YES
24	BD716	YES
25	BD176	-
26	BD177	YES
27	BD178	-
28	BD175	-
29	BD645	-
30	BD727	-
31	BD167	-
32	BD828	-
33	BD168	YES
34	BD169	-
35	BD170	YES
36	BD172	-
37	BD171	-
38	BD173	YES
39	BD174	-

Berikut gambar 4.1 adalah *single line diagram* dan hasil penempatan PMU dengan metode *Binary Integer Linear Programming* (BILP). Bus yang terdapat PMU ditandai dengan bulatan yang berwarna hijau. Sedangkan bus yang tidak terdapat PMU tanpa bulatan hijau (bulatan biasa).



Gambar 4.1 Single line diagram dan penempatan PMU

PMU yang dibutuhkan pada penyulang Nginden setelah dilakukan pengoptimalan menggunakan *Binary Integer Linear Programming* (BILP) adalah 14 PMU dari yang semula 39 PMU. Dengan 14 PMU maka besaran tegangan pada tiap bus dapat diketahui. Metode BILP ini mampu mengurangi 25 PMU atau sekitar 64,1% dari total PMU semula yang dibutuhkan.

4.2 Simulasi State Estimation Penyulang Nginden

Simulasi dilakukan dengan *running* program *state estimation* menggunakan data penyulang Nginden. Berikut hasil dari *state estimation* dengan metode *Extended BC-DSSE*:

Tabel 4.2 Hasil *state estimation* pada penyulang Nginden

No Gardu	Magnitude Tegangan (KV)	Sudut Tegangan
SUKOLILO	20	-0,0000001
BD796	20	-0,000005727
BD715	20	-0,000005727
BD748	20	-0,000005727
BD620	20	-0,0005770
BD567	20	-0,000005727
BD564	20	-0,000005727
BD156	20	-0,000005727
BD157	20	-0,000005727
BD158	20	-0,000005727
BD159	20	-0,0005455
BD160	20	-0,0005702
BD493	20	-0,0005702
BD221	20	-0,001428
BD696	20	-0,001428
BD162	20	-0,000005727
BD919	20	-0,001997
BD163	19,99	-0,004234
BD844	19,99	-0,004234
BD164	19,99	-0,004234

No Gardu	Magnitude Tegangan (KV)	Sudut Tegangan
BD165	19,99	-0,004234
BD849	19,99	-0,004682
BD166	19,99	-0,005815
BD716	19,99	-0,006404
BD176	19,99	-0,006404
BD177	19,99	-0,006404
BD178	19,99	-0,006404
BD175	19,99	-0,006404
BD645	19,99	-0,006404
BD727	19,99	-0,005815
BD167	19,99	-0,007211
BD828	19,99	-0,007211
BD168	19,99	-0,007408
BD169	19,99	-0,007668
BD170	19,99	-0,007211
BD172	19,99	-0,007211
BD171	19,99	-0,007211
BD173	19,99	-0,007303
BD174	19,99	-0,007303

Perbandingan hasil *state estimation* *Extended* BC-DSSE dengan ETAP adalah sebagai berikut:

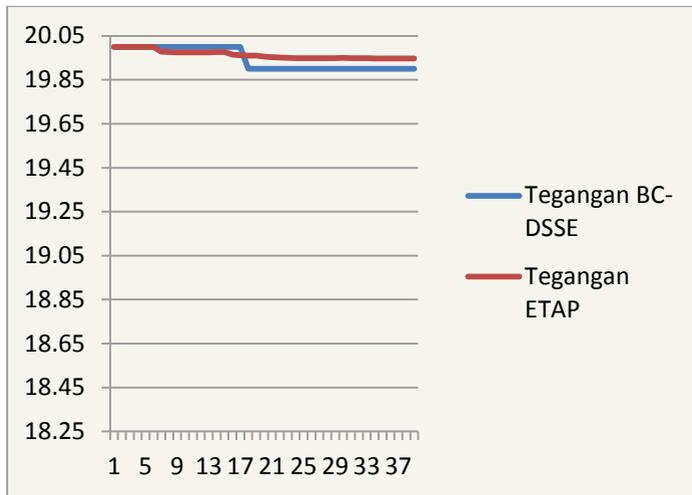
Tabel 4.3 Perbandingan hasil *Extended* BC-DSSE dengan ETAP

No Gardu	Tegangan BC-DSSE (KV)	Tegangan ETAP (KV)	Error (%)
SUKOLILO	20	20	0
BD796	20	19,999	0,005
BD715	20	19,999	0,005
BD748	20	19,999	0,005
BD620	20	19,999	0,005

No Gardu	Tegangan BC-DSSE (KV)	Tegangan ETAP (KV)	Error (%)
BD567	20	19,999	0,005
BD564	20	19,977	0,1151
BD156	20	19,976	0,12
BD157	20	19,975	0,1252
BD158	20	19,975	0,1252
BD159	20	19,975	0,1252
BD160	20	19,975	0,1252
BD493	20	19,975	0,1252
BD221	20	19,976	0,12
BD696	20	19,976	0,12
BD162	20	19,964	0,18
BD919	20	19,962	0,19
BD163	19,99	19,96	0,15
BD844	19,99	19,96	0,15
BD164	19,99	19,955	0,1754
BD165	19,99	19,952	0,19
BD849	19,99	19,951	0,195
BD166	19,99	19,95	0,2005
BD716	19,99	19,949	0,2055
BD176	19,99	19,948	0,21
BD177	19,99	19,948	0,21
BD178	19,99	19,948	0,21
BD175	19,99	19,949	0,2055
BD645	19,99	19,949	0,2055
BD727	19,99	19,95	0,2005
BD167	19,99	19,948	0,21
BD828	19,99	19,948	0,21
BD168	19,99	19,948	0,21
BD169	19,99	19,947	0,2155

No Gardu	Tegangan BC-DSSE (KV)	Tegangan ETAP (KV)	Error (%)
BD170	19,99	19,947	0,2155
BD172	19,99	19,947	0,2155
BD171	19,99	19,947	0,2155
BD173	19,99	19,947	0,2155
BD174	19,99	19,947	0,2155

Berikut hasil validasi Tegangan BC-DSSE dengan Tegangan ETAP ketika ditampilkan dalam grafik.

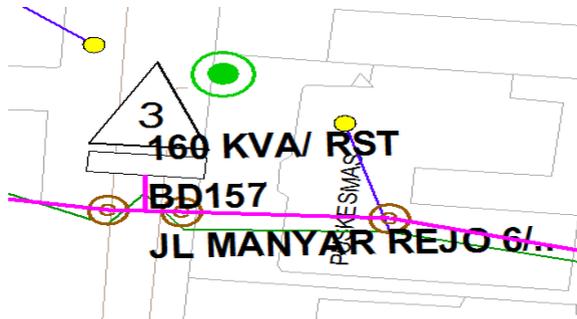


Gambar 4.2 Grafik perbandingan tegangan BC-DSSE dengan ETAP

4.3 Tampilan Hasil Simulasi di Geographic Information System (GIS)

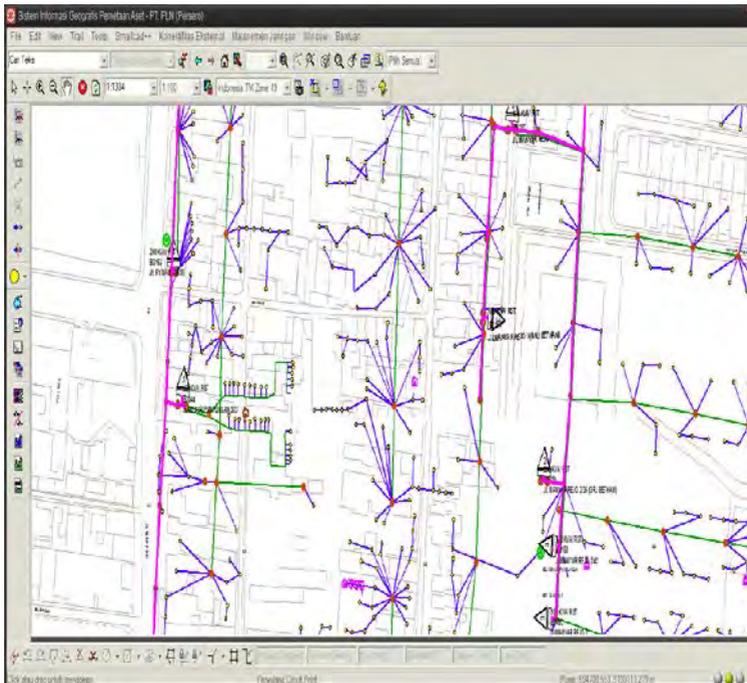
Geographic Information System (GIS) digunakan untuk memonitoring. Dalam hal ini parameter yang dimonitoring adalah tegangan hasil dari *state estimation*. Berikut tampilan GIS dan hasil yang ditampilkan pada GIS untuk tujuan monitoring.

Tampilan penempatan PMU pada GIS ditampilkan dengan bentuk lingkaran berwarna hijau seperti yang ada pada gambar 4.3, sedangkan yang tidak terdapat PMU maka tidak terdapat lingkaran warna hijau.



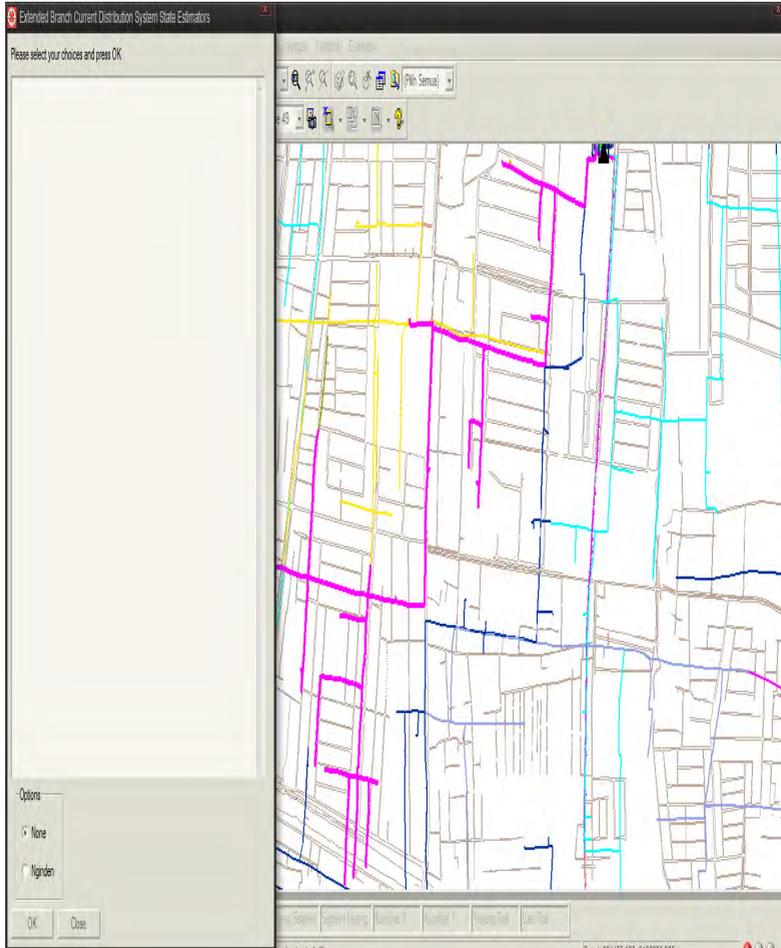
Gambar 4.3 Contoh bus/gardu dengan PMU pada GIS

Berikut tampilan penempatan PMU berdasarkan hasil metode BILP pada gambar 4.4.



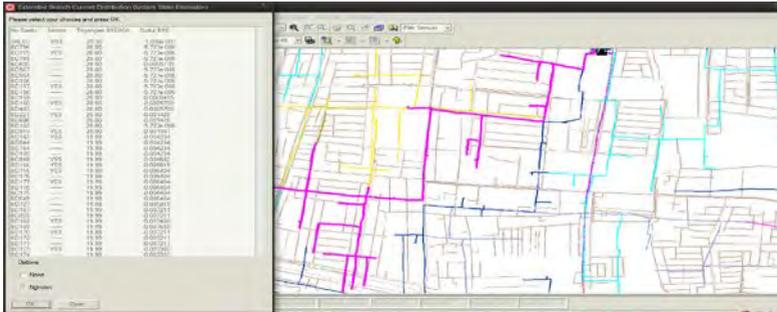
Gambar 4.4 Penempatan PMU di bus/gardu penyalang Nginden pada GIS

Hasil *state estimation* dengan metode *Extended BC-DSSE* di GIS pada gambar 4.5 menggunakan *dialog box* untuk menampilkan tegangan dan PMU yang terpasang di bus atau gardu



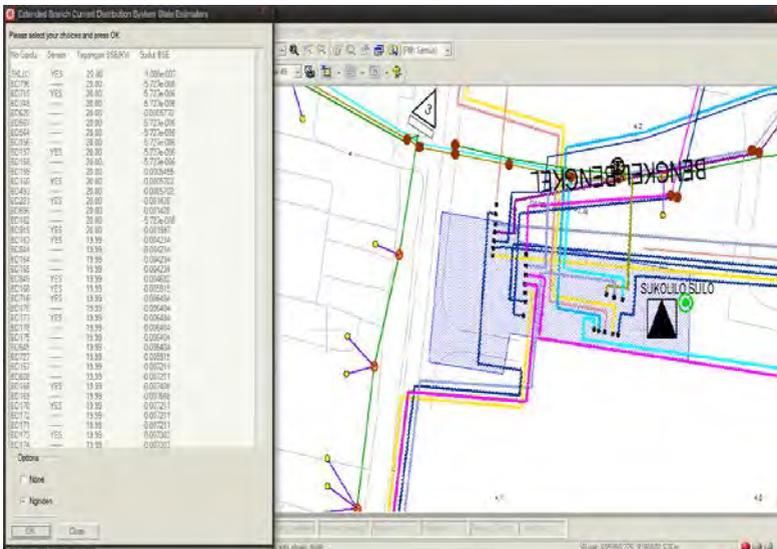
Gambar 4.5 Tampilan awal sebelum *running* metode *Extended BC-DSSE*

Setelah dipilih pilihan “Nginden” dan “ok” maka hasil *running* dari penempatan PMU dan *Extended BC-DSSE* akan muncul seperti pada gambar 4.6.



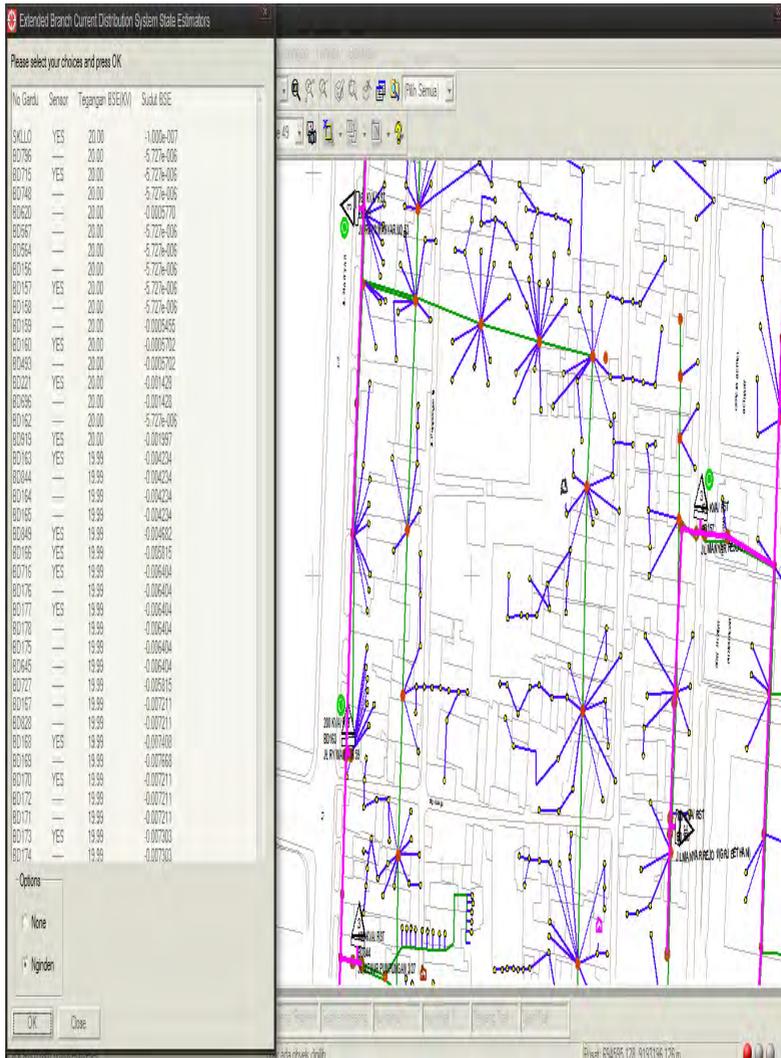
Gambar 4.6 Hasil *running* metode *Extended BC-DSSE*

Untuk melihat lebih jelas penempatan PMU pada bus nomer satu atau pada gardu Sukolilo dapat diperbesar seperti pada gambar 4.7.



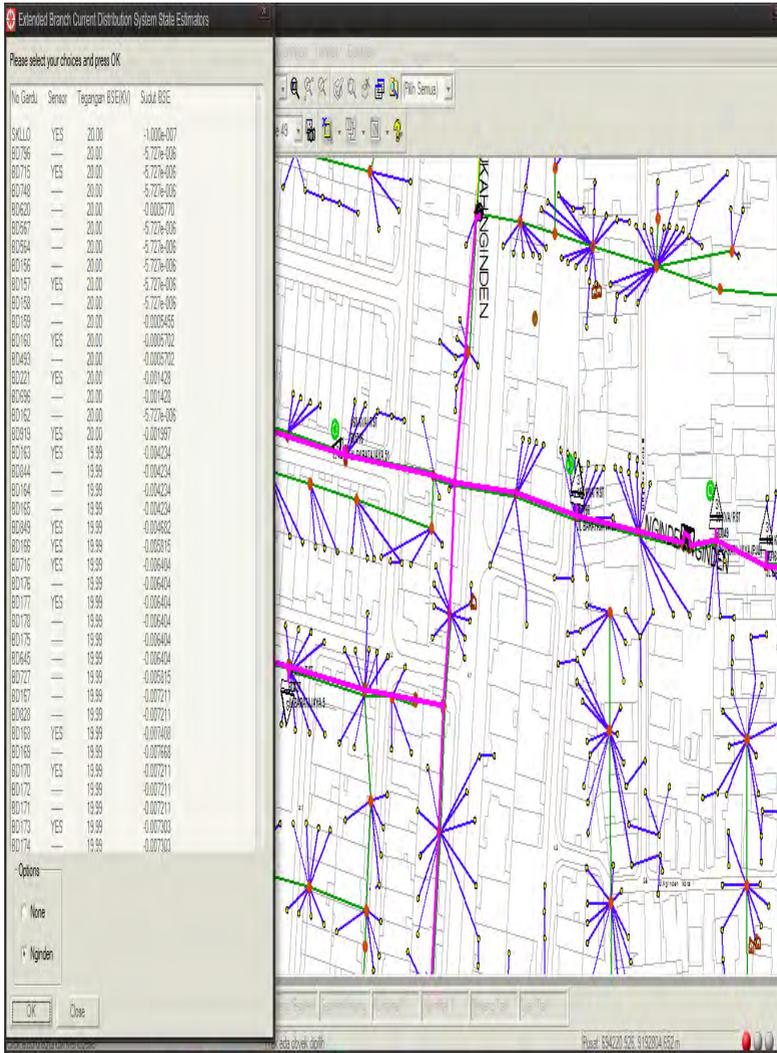
Gambar 4.7 PMU pada *slack bus* dan hasil *state estimation*

Untuk penempatan PMU selain di *slack bus* yaitu pada *load bus* dan hasil *state estimation* pada *dialog box* dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 PMU pada gardu selain *slack bus* dan hasil *state estimation*

Berikut gambar 4.9 adalah contoh lain untuk hasil penempatan PMU (yang terdapat simbol bulat berwarna hijau) dan hasil *state estimation* yang dapat dilihat pada *dialog box*.



Gambar 4.9 PMU pada gardu dan hasil *state estimation*

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Dengan menggunakan metode *Binary Integer Linear Programming* (BILP), dapat mengurangi jumlah PMU sebesar 64,1% dari total PMU semula yang terpasang.
- 2) *State estimation* dengan metode *Extended BC-DSSE* mampu mengestimasi tegangan dengan error paling besar yaitu 0,2155%
- 3) GIS mampu menampilkan peletakkan PMU yang optimal pada gardu/bus dan tegangan hasil *state estimation*.

5.2 Saran

- 1) Untuk penelitian selanjutnya mungkin penempatan PMU bisa menggunakan metode lain yang bisa mengoptimalkan lebih baik lagi
- 2) Penelitian selanjutnya dapat menambahkan penempatan kapasitor untuk perbaikan kualitas daya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

- [10] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Efficient Branch-Current-Based Distribution System State Estimation Including Synchronized Measurements”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 62, No. 9, September, 2013.
- [11] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “WLS Distribution System State Estimator Based on Voltages or Branch-currents: Accuracy and Performance Comparison”, IEEE Conference Publications, Italy, 2013.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suhadi dkk, “Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1 untuk SMK”, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
- [2] Hadi Saadat, “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill inc, 1999.
- [3] Phadke A.G. dan Thorp J.S., “*Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*”. Springer Science+Business Media, LLC., New York, 2008.
- [4] Bei, Gou, “Generalized Integer Linier Programming Formulation for Optimal PMU Placement”, IEEE Trans. Power Syst. , Vol. 23, No. 3, August, 2008.
- [5] J.Wood, Allen and Wollenberg, Bruce F. “Power Generation, Operation and Control (3rd Edition)”, John Wiley & Sons Canada, 2014.
- [6] Sekaran, Kamini K., “Power System State Estimation”, St John’s, Newfoundland, 2008.
- [7] Baran, M. E. dan Kelly A. W., “ State Estimation for Real Time Monitoring of Distribution System” IEEE Trans. Power Syst., Vol.9, No.3, August, 1994.
- [8] Teng, J. H., “Using Voltage Measurements to Improve The Result of Branch-current-based State Estimation for Distribution System”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 6, November, 2002.
- [9] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Branch current state estimator for distribution system based on synchronized measurements,” in Proc. IEEE Int. Workshop AMPS, Sep. 2012, pp. 53–58.

BIODATA PENULIS



Nama : Brendy Chandra S. A.
TTL : Surabaya, 11 Oktober 1992
Jenis Kelamin : Laki - laki
Agama : Kristen
Alamat Rumah: Granting Baru VI/31,
Surabaya
Telp./HP : 087851256156
E-mail : brendy10@mhs.ee.its.ac.id
brendychandra@gmail.com
Hobi : Olahraga

RIWAYAT PENDIDIKAN

- 1998 – 2004 : SDK PENCINTA DAMAI SURABAYA
- 2004 – 2007 : SMP NEGERI 9 SURABAYA
- 2007 – 2010 : SMA NEGERI 1 SURABAYA
- 2010 – 2013 : Bidang Studi Komputer Kontrol, Program D3 Teknik Elektro, ITS
- 2014 – 2016 : Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Program Lintas Jalur S1 Teknik Elektro, ITS

PELATIHAN

- *Training ETAP Basic (Load Flow Analysis) for Industrial Electricity System* pada tahun 2015
- *Training ETAP 1 (Protection) for Industrial Electricity System* pada tahun 2015

PENGALAMAN ORGANISASI

- Badan Pengawas Himpunan D3 Teknik Elektro ITS pada tahun 2011

Halaman ini sengaja dikosongkan