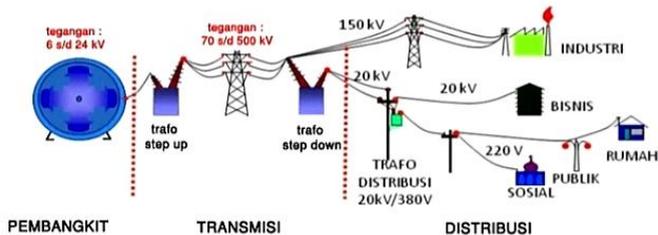


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Transmisi Tenaga Elektrik

Pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3, yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Daya listrik yang dihasilkan oleh pusat – pusat pembangkit listrik (power plant) seperti PLTU, PLTA, PLTS, PLTG, dan PLTD disalurkan melalui jaringan transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya menggunakan transformator step up pada pusat pembangkit listrik. Saluran transmisi mempunyai tegangan 70kV, 150kV, dan 500kV. Dari jaringan transmisi daya listrik disalurkan ke gardu induk (GI) kemudian diturunkan tegangannya menggunakan transformer step down menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang digunakan PLN adalah tegangan 20kV. Setelah daya listrik disalurkan melalui jaringan tegangan menengah (JTM), maka daya listrik kemudian di step – down lagi tegangannya menuju gardu – gardu distribusi menjadi tegangan rendah, yaitu tegangan 380/220 volt, lalu disalurkan ke konsumen.



Gambar 2. 1 Alur Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan klasifikasi tegangan, sistem transmisi dibagi menjadi :

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV – 500kV

Umumnya saluran transmisi di indonesia digunakan pada pembangkit dengan kapasistas 500kV. Tujuannya agar drop

tegangan dari penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga operasional yang diperoleh efektif dan efisien. Namun permasalahan dalam pembangunan SUTET ialah konstruksi tiang besar dan tinggi, tanah yang luas serta isolator yang banyak, sehingga memerlukan biaya besar. Faktor masalah lain dalam pembangunan SUTET ialah masalah sosial yang berdampak pada masalah pembiayaan.

2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV – 150kV
Saluran transmisi ini memiliki tegangan operasi antara 30kV sampai 150kV yang memiliki jarak terjauh paling efektif sekitar 100 km. Jika jarak transmisi lebih dari 100 km, maka drop tegangan pada jaringan semakin besar, sehingga tegangan pada ujung transmisi menjadi rendah.

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Sistem daya listrik merupakan jaringan yang terdiri dari penghantar dan peralatan yang dibutuhkan untuk mentransmisikan energi listrik dari pembangkit ke konsumen. Stabilitas sangat penting dalam memastikan keamanan operasi sistem daya, terutama pada jaringan interkoneksi yang dipengaruhi oleh variasi beban yang tersambung.

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan sebagai kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi normal atau memulihkan ketidakstabilan setelah terjadi gangguan, tanpa menyebabkan pemadaman atau terlepasnya komponen-komponen di area tersebut. Untuk menjaga kestabilan, integritas sistem harus tetap utuh tanpa adanya pemutusan pada sisi pembangkit atau beban. Namun, jika gangguan mengharuskan pemutusan, maka sistem dapat diisolasi dari elemen yang terganggu agar operasi keseluruhan tetap berlanjut.

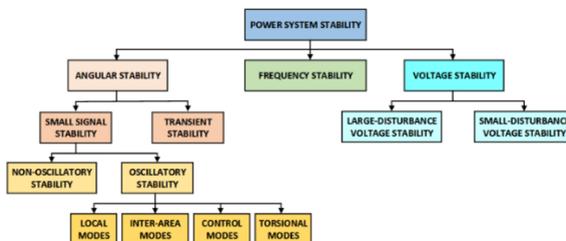
Untuk mempertahankan kestabilan sistem daya elektrik maka sistem harus dalam kondisi seimbang yaitu antara daya yang dibangkitkan dengan daya yang dibutuhkan beban. Sehingga daya elektrik dapat dioperasikan dengan baik dan dapat memenuhi standar dalam hal frekuensi, tegangan dan keandalan.

Sistem daya elektrik memiliki 3 bagian, yaitu:

1. *Reliability* didefinisikan sebagai kemampuan sistem daya elektrik untuk menyediakan suplay daya bagi kebutuhan beban
2. *Security* didefinisikan sebagai kemampuan sistem daya elektrik untuk merespon gangguan yang terjadi.
3. *Adequency* didefinisikan ketersediaan fasilitas yang

mencukupi untuk menyediakan daya yang dibutuhkan oleh konsumen.

Masalah kestabilan pada sistem tenaga elektrik diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu sebagai berikut (**Gambar 2.2**) :



Gambar 2.2 Klasifikasi Masalah Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

1. Stabilitas sudut rotor (*Angular Stability*)

Stabilitas sudut rotor didefinisikan sebagai kemampuan mesin sinkron dalam sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi untuk tetap berada dalam keadaan sistem sinkron saat setelah terjadi gangguan. Hal ini dapat bergantung dalam kemampuan sistem untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing-masing mesin sinkron pada sistem.

Pada saat sistem mengalami ketidakstabilan bisa disebabkan oleh terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kehilangan sinkronisasi terjadi antara satu mesin dengan sistem atau dengan beberapa kelompok mesin, antara sinkronisasi yang dipertahankan dengan masing-masing kelompok setelah pemisahan antara satu dengan yang lain. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi stabilitas sudut rotor sinyal kecil (*Small Signal Stability*) dan stabilitas transien (*Transient Stability*).

2. Stabilitas frekuensi (*Frequency Stability*)

Stabilitas frekuensi didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tetap dalam kondisi normal setelah mengalami gangguan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkit dan

beban. Hal ini bergantung pada kemampuan sistem mengembalikan keseimbangan antara sistem beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi kehilangan beban.

Masalah stabilitas frekuensi biasanya terkait dengan respon peralatan yang tidak memadai, koordinasi peralatan kontrol dan perlindungan buruk, atau dari cadangan pembangkitan yang tidak memadai.

3. Stabilitas tegangan (*Voltage Stability*)

Stabilitas tegangan didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan tetap pada semua bus dalam sistem pada saat kondisi normal maupun saat sistem mengalami gangguan. Ketidakstabilan tegangan yang terjadi pada sistem dapat menyebabkan beban tersandung, gangguan saluran transmisi atau distribusi, kehilangan sinkronisasi pada generator tertentu dan terjadi *voltage collapse*.

2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan bagian paling penting dalam pengoperasian sistem sehingga dapat digunakan untuk menjaga ketersediaan suplai daya listrik secara berkelanjutan dengan kualitas daya yang baik dan juga dapat meminimalisasi terjadinya blackout total maupun sebagian. Stabilitas tegangan didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan nilai tegangan tetap yang dapat ditoleransi pada setiap bus jaringan baik dalam kondisi normal atau pada saat sistem mengalami gangguan.

Stabilitas tegangan ditentukan oleh parameter seperti karakteristik sistem, menghasilkan perilaku beban unit, control kontinu dan distrit serta interaksi perlindungan. Pada setiap sistem tenaga dirancang untuk beroperasi dan berfungsi dengan baik dengan rentang tegangan berkisar -5% dan +10%. Ketika tegangan tidak dalam batas yang ditentukan maka tegangan dianggap sebagai *voltage collapse* dan dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan tegangan. Ketidakstabilan tegangan didefinisikan sebagai ketidakmampuan sistem dalam mempertahankan nilai tegangan dalam batas yang dapat diterima yaitu 0,95 pu – 1,05 pu di beberapa atau semua bus dalam keadaan kondisi normal atau setelah mengalami gangguan, yaitu probabilitas tunggal rendah atau beberapa kemungkinan yang menyebabkan penurunan tegangan secara bertahap dan tidak terkendali.

Istilah-istilah yang terkait dengan stabilitas tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut:

- a. Stabilitas tegangan (*Voltage Stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan yang diperbolehkan, baik dalam kondisi normal maupun setelah terjadi gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*Voltage Collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah.
- c. Keamanan tegangan (*Voltage Security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik baik secara stabil maupun tidak stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) pada saat sistem mengalami gangguan atau saat adanya perubahan yang signifikan pada sistem.

Analisis stabilitas tegangan dapat dibagi menjadi analisis stabilitas tegangan statis dan dinamis. Untuk menganalisis masalah stabilitas tegangan statis perlu diterapkan dalam operasi waktu nyata, dan perhitungannya memakan waktu yang singkat. Sebaliknya, analisis dinamis lebih akurat daripada analisis statis, tetapi membutuhkan informasi data yang cukup besar untuk pemodelan dan berhubungan dengan koordinasi perlindungan, kontrol, dan analisis stabilitas jangka pendek. Sehingga Kedua metode ini dapat digunakan jika terjadi ketidakstabilan tegangan dengan menganalisa seperti bagaimana dan mengapa ketidakstabilan tegangan terjadi, dapat mengidentifikasi area kelemahan tegangan dalam jaringan yang dipelajari, dan juga dapat mengidentifikasi langkah-langkah paling efektif untuk mengatasi ketidakstabilan serta dengan adanya perluasan maka dapat meningkatkan stabilitas tegangan.

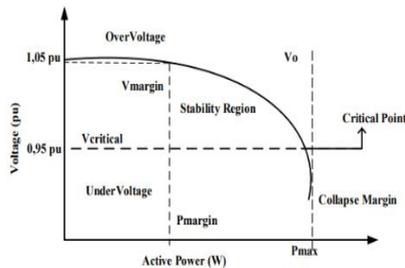
2.3.1 Analisis Stabilitas Tegangan Statis

Melalui analisis tegangan statis dapat diterapkan dalam operasi waktu nyata dan perhitungan yang cepat sehingga sebagian besar masalah dapat diselesaikan karena beberapa informasi yang diperlukan terkait dengan status stabilitas tegangan sistem. Teknik analisis statis ini biasanya digunakan untuk mendeteksi titik kegagalan tegangan dan untuk menentukan batas kemampuan sistem tenaga.

Metode yang telah ditetapkan untuk menganalisis stabilitas tegangan statis adalah metode yang didasarkan pada kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) dan Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan), aliran daya lanjutan, dan singularitas aliran daya matriks jacobian pada titik keruntuhan tegangan. Semua metode analisis tersebut digunakan untuk menentukan titik collapse, yaitu berdasarkan titik dimana tegangan mengalami penurunan tegangan pada beban maksimum yang dapat ditoleransi oleh sistem. Titik keruntuhan tegangan terjadi pada saat sistem tenaga mengalami gangguan atau pada saat sistem mengalami kekurangan daya reaktif.

2.3.1.1 Analisis kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan)

Analisis kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) merupakan metode yang paling populer dan banyak digunakan pada analisa stabilitas statis dan berguna untuk memprediksi keamanan tegangan. Metode kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) banyak digunakan untuk menganalisis stabilitas tegangan dengan cara menentukan jumlah margin daya aktif yang tersedia sebelum titik *voltage collapse*.



Gambar 2.3 Grafik Kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan)

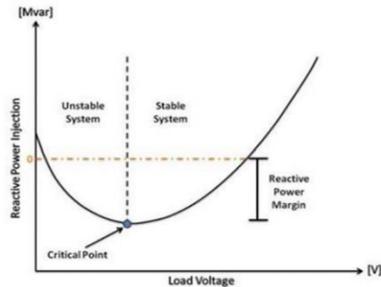
Dari grafik gambar 2.3 diatas. Kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) menunjukkan bagaimana kurva menurun seiring dengan meningkatnya permintaan secara bertahap, tegangan akan menurun hingga titik hidung kurva tercapai.

Pada titik hidung peningkatan lebih lanjut dalam daya aktif tidak memberikan besarnya tegangan yang tepat maka momen itu disebut dengan voltage collapse yang biasanya terjadi. Dimana jarak antara titik operasi dan titik hidung biasanya diberikan sebagai margin daya aktif sedangkan jarak antara titik operasi dan titik kritis disebut margin tegangan. Jika hasil tegangan diantara batas stabilitas tegangan yaitu diantara tegangan lebih dari 0,95 pu dan kurang dari 1,05 pu maka bahwa sistem dalam kondisi stabil, namun ketika tegangan dibawah 0,95 pu maka tegangan pada sistem akan mengalami undervoltage sedangkan ketika nilai tegangan pada sistem diatas 1,05 pu maka sistem akan mengalami overvoltage.

2.3.1.2 Analisis Kurva Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan)

Analisis stabilitas tegangan melalui Kurva Q-V ini adalah untuk melihat pada kondisi beban total berapa (MVar) tegangan sistem mengalami kollaps. Artinya kemampuan sistem dalam menyalurkan daya reaktif telah melebihi kemampuan sistem itu sendiri Adapun kurva V-Q dapat dilihat pada gambar 2.4.

Garis putus-putus pada gambar 2.4 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas kemampuan beban pada keadaan mantap untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil.



Gambar 2.4 Kurva Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan)

2.3.2 Analisa Stabilitas Tegangan Dinamik

Analisa stabilitas tegangan dinamik sangat penting dalam perencanaan dan desain jaringan listrik selama operasi sistem. Analisis stabilitas dinamik didasarkan pada persamaan differensial dengan melihat bagaimana tegangan bus bervariasi dengan perubahan parameter operasi sistem. Berbagai parameter PV, seperti isolasi matahari (radiasi matahari dan suhu), dan pemodelan dinamis (konverter elektronik daya dan kompensator daya reaktif), parameter tersebut sangat penting dalam analisis stabilitas tegangan dinamis yang terhubung ke sistem jaringan.

Analisis dinamik digunakan untuk mengevaluasi perilaku tegangan selama gangguan pada sistem transmisi. Dengan mempelajari analisis domain waktu dengan mempertimbangkan gangguan pada lokasi dan waktu tertentu.[22][23] Metode yang biasa digunakan untuk analisa tegangan dinamis adalah analisis stabilitas sinyal kecil, simulasi domain waktu, dan analisis metode bifurkasi.[24]

Analisa stabilitas tegangan dinamik yang akan dilakukan yaitu menggunakan gangguan short-circuit pada busbar beban dengan setting waktu selama 0,5 detik di DigSILENT PowerFactory.

2.4 Studi Aliran Daya (*Load Flow*)

Daya listrik selalu akan mengalir menuju beban (load). Beban dapat digolongkan menjadi dua yaitu beban statis dan beban berputar (dinamis). Beban-beban ini dapat direpresentasikan sebagai impedan tetap (Z), sebagai daya yang tetap (S), tegangan (V) atau arus (I) yang tetap. Tetapi yang biasa dipilih sebagai pembebanan yaitu menggunakan tegangan

konstan. Besarnya aliran daya di setiap saluran beserta rugi-ruginya dapat diketahui dengan menghitung lebih dahulu besaran (magnitude) tegangan dan sudut fasornya semua bus pada sistem.

Pada setiap bus sistem terdapat 4 parameter yaitu :

1. Daya nyata (real power), simbol P satuan megawatt (MW).
2. Daya semu (reactive power), simbol Q, satuan megavoltampere reactive (MVAR).
3. Tegangan, simbol V, satuan kilovolt (KV).
4. Sudut fasa tegangan, satuan radian (rad).

Dari 4 parameter tersebut, untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya listrik pada setiap bus. Perlu diketahui nilai 2 buah parameternya, tergantung pada parameter-parameter yang diketahui, maka pada setiap simpul di sistem diklasifikasikan dalam 3 kategori, yaitu :

1. Bus beban (*load bus or PQ buses*)

Parameter-parameter yang diketahui adalah P dan Q, parameter-parameter yang tidak diketahui adalah V dan δ

2. Generator bus (*voltage – controlled bus or P – V buses*).

Parameter-parameter yang diketahui adalah P dan V, dimana pada bus ini mempunyai kendala untuk daya semu (Q) yang melalui bus. Bila kendala ini didalam perhitungan integrasinya tidak dipenuhi, maka simpul ini diganti menjadi bus beban. Sebaliknya, bila daya memenuhi kendala akan dihitung sebagai simpul kendali kembali. Parameter-parameter yang tidak diketahui adalah δ dan Q.

3. *Slack Bus*

Parameter-parameter yang diketahui adalah V dan δ , dengan V dan selama perhitungan aliran daya akan tetap tidak berubah. Fungsi dari simpul ini ditentukan dalam perhitungan yaitu untuk memenuhi kekurangan daya (rugi-rugi dan beban) seluruhnya, karena kerugian jaringan tidak dapat diketahui sebelum perhitungan selesai dilakukan. Parameter-parameter yang tidak diketahui adalah P dan Q

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah jenis pembangkit yang memanfaatkan iradiasi matahari untuk menghasilkan listrik DC melalui modul *Fotovoltaik* (PV). Listrik DC ini kemudian dikonversi menjadi listrik AC menggunakan inverter, yang kemudian digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. PLTS termasuk salah satu pembangkit

energi terbarukan yang semakin populer karena dinilai efisien, ramah lingkungan, dan mudah dalam pemasangannya. Meski belum mampu sepenuhnya menggantikan pembangkit konvensional, PLTS membantu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan dan berkontribusi dalam meningkatkan pasokan listrik.

PLTS dikategorikan ke dalam dua jenis sistem, yaitu sistem panel surya skala kecil dan skala besar. Pada skala kecil, sistem biasanya berkapasitas 20 MW dan terhubung ke jaringan distribusi atau sub-transmisi. Sedangkan pada skala besar, kapasitas sistem bisa mencapai 1000 MW dan terhubung ke jaringan transmisi. Panel surya dapat dipasang di atap atau di tanah, dengan beban tertentu. Untuk sistem yang terhubung dengan jaringan, seringkali dipasang di lokasi terpencil dengan lahan luas.

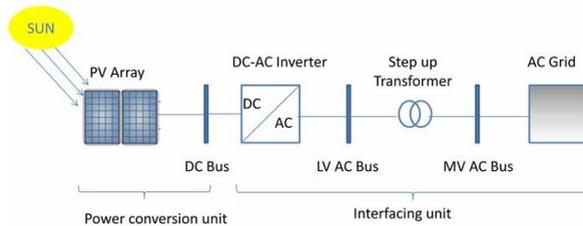
Energi surya juga dikategorikan sebagai energi terbarukan yang non-dispatchable, artinya energi yang dihasilkan tidak dapat dikontrol karena bergantung pada kondisi cuaca yang tidak menentu. Hal ini menyebabkan ketika PLTS terhubung ke jaringan distribusi, kinerja jaringan penyulang dapat dipengaruhi, yang pada akhirnya berdampak pada kestabilan sistem. Namun, di sisi lain, integrasi PLTS ke dalam jaringan distribusi juga memberikan beberapa manfaat, seperti perbaikan profil tegangan, pengurangan rugi daya, peningkatan keandalan sistem, dan lain-lain.

Sistem PLTS menurut lokasi pemasangannya menjadi dua jenis yaitu pembangkit listrik PLTS terpusat dan PLTS terdistribusi, sedangkan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik atau grid dibagi menjadi dua jenis menurut susunannya yaitu: PLTS pada jaringan (on-grid) dan PLTS yang terpisah jaringan (off-grid). PLTS Terapung Cirata ini sistem konfigurasi on-grid dengan kapasitas 192 MWp, dimana PLTS tersebut langsung terhubung ke jaringan milik Perusahaan Listrik Negara (PLN) di transmisikan kedalam sistem Jawa-Bali.

Agar dapat terhubung ke grid, PLTS terapung Cirata harus memenuhi beberapa persyaratan utama yang sangat ditentukan oleh kualitas arus (IPV) dan tegangan (VPV) yang dihasilkan oleh sistem PLTS tersebut, serta arus (IAC) dan tegangan (VAC) yang ada pada jaringan listrik. Sistem PLTS memiliki utilitas dan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya. Perbedaan paling mendasar adalah tidak adanya penggunaan peralatan mekanis dalam proses konversi energi matahari menjadi listrik. Karena tidak adanya sistem mekanik, operasional dan penanganan PLTS juga berbeda

dari pembangkit listrik lainnya.

Penanganan utama yang diperlukan adalah terkait beberapa kondisi dinamis, yaitu fluktuasi intensitas radiasi dan suhu terhadap waktu. Fluktuasi ini mempengaruhi kinerja panel surya dan inverter dalam mengkonversi energi matahari menjadi listrik. Model aliran daya PLTS on grid ditampilkan pada Gambar 1 untuk memberikan visualisasi yang lebih jelas tentang bagaimana sistem ini bekerja dalam mengalirkan daya listrik ke jaringan transmisi.



Gambar 2.5 Komponen sistem PV yang terhubung ke jaringan

Sistem yang terhubung ke jaringan dapat dibagi menjadi dua bagian utama yaitu unit konversi tenaga surya dan unit antarmuka. Unit konversi daya dilengkapi dengan panel surya, DC bus, konverter DC-DC (jika diperlukan). Selanjutnya, tegangan DC yang dihasilkan oleh PV disalurkan ke Bus DC yang terhubung dengannya. Setelah itu, inverter DC-AC yaitu mengubah tegangan DC yang dihasilkan oleh PV menjadi tegangan AC dan masuk ke sistem atau AC grid[22]. Kemudian dengan kabel AC, sistem PV dapat dihubungkan ke jaringan transmisi tegangan rendah atau menengah. Biasanya, sistem PV dihubungkan ke jaringan AC tegangan menengah melalui trafo step up seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.