

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang Masalah

Energi listrik merupakan salah satu hal yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Energi listrik berperan penting dalam kehidupan masyarakat dan sebagai penunjang dari pengembangan berbagai sektor ekonomi. Seiring berkembangnya zaman, dalam menjalankan perekonomian masyarakat saat ini sangat bergantung pada energi listrik. Oleh karena itu, konsumsi listrik yang besar menjadikan negara berkewajiban untuk memenuhi ketersediaan energi listrik agar sejalan dengan kebutuhan masyarakat.

Produksi energi listrik didunia saat ini sebagian besar masih didominasi dari bahan bakar fosil. Sedangkan penggunaan minyak, batubara, dan gas sebagai bahan bakar pembangkit energi listrik dapat berakibat buruk bagi lingkungan dan ekonomi. Oleh sebab itu, dibutuhkan sebuah solusi untuk mengatasi hal tersebut. Sumber energi listrik yang menggunakan energi terbarukan merupakan solusi untuk mengatasi permasalahan ini.

Energi terbarukan berasal dari proses alami dan kemungkinan besar tidak akan habis. Potensi pengembangan energi terbarukan di Indonesia sangat besar. Salah satu inisiatif energi terbarukan yang dilakukan adalah pembangunan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Sulawesi Selatan yaitu di Kabupaten Sidrap dan Kabupaten Jeneponto. Pembangkit listrik ini menggunakan turbin angin untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Tipe pembangkitan energi listrik dengan pemanfaatan energi angin tergolong baru untuk di Indonesia walaupun di negara-negara maju seperti Belanda dan Inggris sudah lama digunakan.

Sistem Sulbagsel merupakan sistem kelistrikan interkoneksi se-Sulawesi Selatan yang terdiri dari pembangkit berbeda-beda yang tersebar di Sulawesi Selatan disalurkan melalui transmisi 275 kV dan 150 kV hingga ke konsumen melalui distribusi 20 kV dan 11 kV. Sistem kelistrikan ini memiliki daya total sebesar 1.705,8

MW dengan beban puncak 1.310,8 MW atau sekitar 76,8% dari daya total. Artinya, sistem tersebut memiliki cadangan sebesar 395 MW atau 30,2% yang menandakan sistem kelistrikan masih terhitung aman. Namun, adanya pembangkit yang dapat mengalami fluktuasi seperti PLTB dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap kestabilan sistem.

Kecepatan tenaga angin yang digunakan untuk menghasilkan listrik pada PLTB tidak selalu konstan, terjadinya fluktuasi tidak dapat dihindari dan diremehkan karena dapat mempengaruhi tegangan keluaran dari pembangkit. Variasi tegangan yang signifikan dapat menyebabkan gangguan pada sistem tenaga listrik yang terhubung ke PLTB. Ketika kestabilan tegangan terganggu, hal tersebut dapat mengakibatkan *voltage collapse*, profil tegangan yang sangat rendah berpotensi menimbulkan *blackout*. Begitu juga perubahan daya reaktif yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada sistem dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi-rugi daya juga akan semakin besar ketika sistem beroperasi pada beban maksimum. PLTB adalah pembangkit listrik yang menghasilkan daya aktif dan melepaskan daya reaktif, dikarenakan PLTB menggunakan generator asinkron/induksi. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan pemasangan peralatan kompensasi daya reaktif seperti STATCOM untuk menjaga kestabilan tegangan sistem yang berfungsi untuk mengatur tegangan bus dengan cara menginjeksikan daya reaktif yang dapat diatur kedalam sistem.

Untuk menjaga kestabilan dan kualitas daya sistem, diperlukan penerapan STATCOM yang optimal. Penempatan STATCOM yang tepat dalam suatu sistem tenaga listrik merupakan komponen penting dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas penggunaannya.

Oleh karena itu, dilakukan sebuah penelitian yang berjudul “Studi Optimasi Pemasangan STATCOM Pada Sistem Interkoneksi Sulbagsel dengan Menggunakan Metode VSI (*Voltage Stability Indeks*).

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan lokasi untuk pemasangan dan kapasitas STATCOM pada sistem interkoneksi Sulbagsel dengan metode FVSI (*Fast Voltage Stability Indices*) ?
2. Bagaimana menganalisis kestabilan tegangan pada sistem interkoneksi Sulbagsel sebelum dan setelah pemasangan STATCOM ?

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu:

1. Menentukan lokasi untuk pemasangan dan kapasitas STATCOM pada sistem interkoneksi Sulbagsel dengan metode FVSI (*Fast Voltage Stability Indices*).
2. Menganalisis kestabilan tegangan pada sistem interkoneksi Sulbagsel sebelum dan setelah pemasangan STATCOM.

I.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Secara akademis, diharapkan penelitian ini akan berguna dalam pengembangan teori-teori terkait kestabilan sistem tenaga dan pengaplikasian FVSI dalam kestabilan sistem tenaga..
2. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan pertimbangan bagi PT. PLN (Persero) sebagai suatu upaya menjaga kestabilan tegangan sistem.

I.5 Batasan Masalah

Batasan Masalah dari penelitian ini adalah:

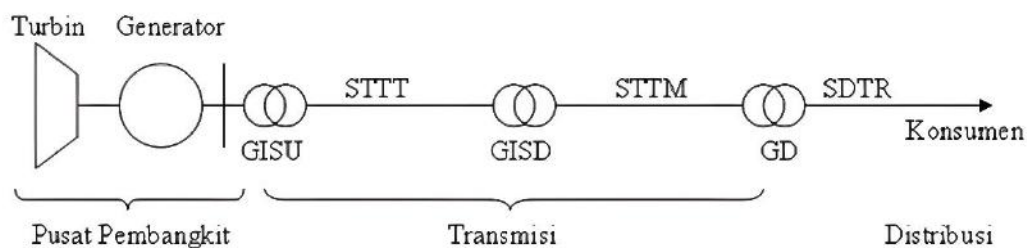
1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah jaringan transmisi sistem interkoneksi Sulbagsel.
2. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab.
3. Analisis sistem dilakukan dalam keadaan beban seimbang.
4. Analisis yang dilakukan hanya untuk kestabilan tegangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik terdiri atas sistem pembangkitan, transmisi dan distribusi. Secara umum rancangan (*lay out*) dari sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (blackout). (Hasmudi, N. K. 2020)

2.1.1 Sistem Pembangkitan

Pembangkit tenaga listrik yaitu tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (*Prime mover*) dan generator yang membangkitkan listrik (Pramono, Buwono dan Zamrudi, 2010: 1). Murnomo mengatakan pembangkitan energi listrik sebagian besar dilakukan dengan memutar generator sinkron (*alternator*). Dapat juga diperoleh dari perubahan energi lain, seperti energi kinetik, kalor dan sebagainya secara langsung maupun tidak langsung,

konvensional atau non konvensional. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5 kV) menjadi tegangan transmisi /tegangan tinggi (150 kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur. Pembangkit berfungsi untuk mengkonversikan sumber daya energi primer menjadi energi listrik. Pusat pembangkit listrik konvensional mencakup:

- a. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)
- b. Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)
- c. Pusat Listrik Tenaga Gas (Gas)
- d. Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Disamping pembangkit listrik konvensional masih ada pembangkit listrik non konvensional seperti:

- a. Pembangkit Listrik Tenaga Angin
- b. Pembangkit Listrik Tenaga Matahari

2.1.2 Jaringan Transmisi

Saluran transmisi berfungsi untuk mengirim atau mentransmisikan energi listrik dari pusat pembangkit sampai pada gardu distribusi dengan menggunakan tegangan tinggi dan menengah. Tugas sistem transmisi adalah menyalurkan tenaga listrik dalam jumlah besar ke pusat beban atau perusahaan-perusahaan pemakai tenaga listrik besar (Soepartono dan Ismu, 1980: 2). Ada dua kategori saluran transmisi yaitu saluran udara (*Overhead Lines*) dan saluran kabel tanah (*Underground cable*). Yang pertama menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator-isolator, sedang untuk kategori kedua menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah tanah. Kedua cara penyaluran di atas mempunyai untung ruginya sendiri-sendiri. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan, hujan angin, bahaya petir dan sebagainya. Lagi pula, saluran bawah tanah lebih estetik karena tidak mengganggu pandangan. Namun biaya pembuatannya jauh lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara, dan perbaikannya lebih sukar bila terjadi gangguan hubung singkat dan kesukaran-kesukaran lain yang biasa dipakai untuk menyalurkan tenaga listrik dalam jumlah

besar adalah sistem transmisi arus bolak-balik 3 fasa, saluran udara. Tegangan sistem transmisi adalah 30 kV sampai 700 kV (Soepartono dan Ismu, 1980: 2). Tegangan transmisi di Indonesia telah ditentukan oleh pemerintah, yaitu:

- a. Tegangan nominal sistem (kV) (30) – 66 – 110 – (150) – 220 – 380 – 500.
- b. Tegangan tertinggi perlengkapan (kV) (36) – 72,5 – 123 – (170) – 245 – 420 – 525.
- c. Tegangan ini disesuaikan dengan anjuran (rekomendasi) dari *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Tegangan angka di dalam kurung, lebih disukai. Dalam membuat rencana penyaluran tenaga listrik, harus diperhatikan:

- a. Pemilihan tegangan
- b. Pemilihan jenis kawat dan penampang kawat
- c. Pemilihan sistem perlindungan terhadap gangguan-gangguan
- d. Kontinuitas penyaluran tenaga listrik
- e. Pembebasan tanah yang dilewati.

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*black out*).

Keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada *prime mover* dengan daya *output* listrik (beban listrik). Dalam keadaan seperti ini, semua generator berputar pada kecepatan sinkron.

Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis pada prime mover dari generator-generator. Bila daya input mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan maka sesaat akan terjadi perbedaan yang besar antara daya *input* mekanis dan daya *output* listrik dari generator.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat yang memungkinkan mesin bergerak sinkron dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal.

Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

Hilangnya sinkronisasi merupakan ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban dan menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang. Faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi. (Adriani. 2012)

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti: “*Reliability, Quality dan Stability*”.

- ✓ **Reliability** adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.

- ✓ **Quality** adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
- ✓ **Stability** adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi yaitu sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran untuk tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan. (Mumtaz, A. F. 2020)

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*) dan kestabilan tegangan (*Voltage Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor di klasifikasikan menjadi *Small Signal Stability* dan *Transient Stability*. *Small Signal Stability* adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam, sedangkan *Transient Stability* dikarenakan kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas. Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*).
2. Stabilitas peralihan (*transient*).
3. Stabilitas sub peralihan (*dynamism*).

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).

Stabilitas transient adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja.

Stabilitas dynamism adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transient) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas transient bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan transient yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi.

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

1. Faktor mekanis dapat berupa:
 - a. Torsi *input prime* beban.
 - b. Inersia dari *prime mover* dan generator.
 - c. Inersia motor dan sumbu beban.
 - d. Torsi input sumbu beban.
2. Torsi listrik berupa:
 - a. Tegangan internal dari generator sinkron.
 - b. Reaktansi sistem.

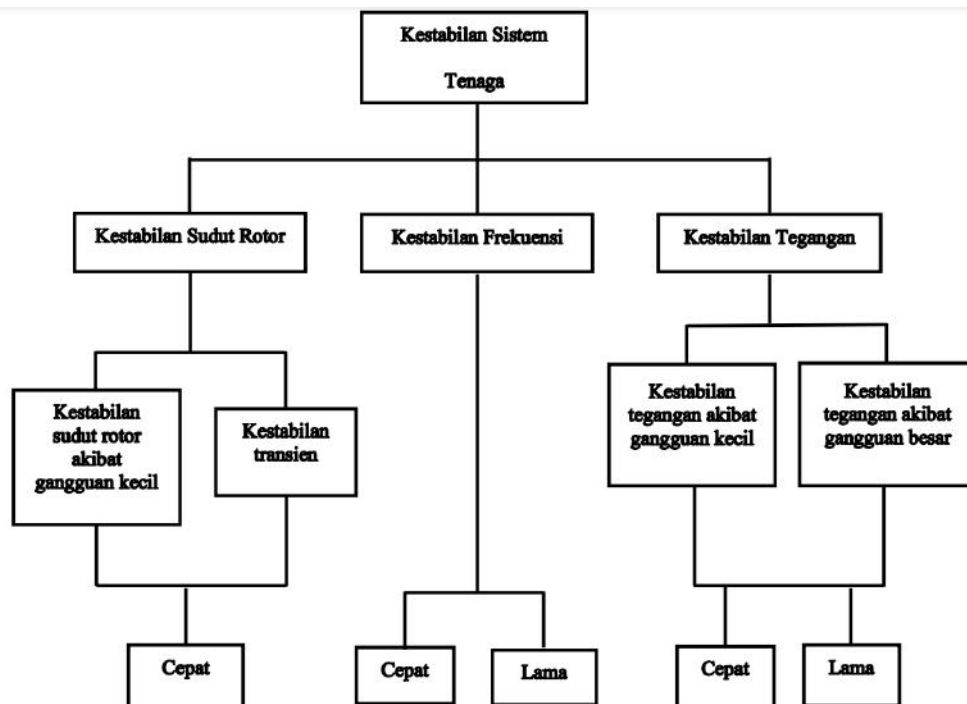
(Erwin Syahputra, Z. P. 2018).

2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini:

- a. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- c. Divais, proses dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan

Secara umum permasalahan kestabilan sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*), kestabilan tegangan (*Voltage Stability*) dan kestabilan frekuensi (*Frequency Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi *Small Signal Stability* dan *transient Stability*. *Small signal Stability* adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam, sedangkan *Transient Stability* dikarenakan kurang serempaknya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.



Gambar 2. Diagram klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik

Gambar 2 menunjukkan gambaran menyeluruh tentang masalah kestabilan sistem tenaga listrik yang diidentifikasi berdasarkan kategori dan sub kategorinya.

2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mempertahankan keadaan sinkron di bawah kondisi operasi setelah mengalami gangguan oleh mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam sebuah sistem tenaga listrik. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin sinkron pada sistem. Ketidakstabilan dapat menyebabkan terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kehilangan sinkronisasi dapat terjadi antara satu mesin dengan sistem atau antara beberapa kelompok mesin, antara sinkronisasi yang dipertahankan dengan masing-masing kelompok setelah pemisahan satu sama lain. Untuk tetap mempertahankan kestabilan dari sinkronisasi sistem perbedaan sudut rotor antar generator tidak boleh melebihi dari batas kestabilan sudut rotor sebesar 90° . Kestabilan sudut rotor dibagi

menjadi dua kategori, yaitu kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak) dan kestabilan gangguan besar (keadaan transien)

2.3.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti beberapa gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi pelepasan unit dan atau kehilangan beban.

2.3.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan sistem daya untuk mempertahankan tegangan stabil di semua bus dalam sistem setelah dikenakan gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Itu tergantung pada kemampuan mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara memuat permintaan dan pasokan beban dari sistem tenaga. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi dalam bentuk jatuhnya atau naiknya tegangan beberapa bus. Kemungkinan hasil ketidakstabilan tegangan adalah hilangnya beban di suatu area, atau tersandung transmisi garis-garis dan elemen-elemen lain oleh sistem pelindung mereka yang mengarah ke gangguan aliran listrik. Hilangnya sinkronisme beberapa generator dapat dihasilkan dari pemadaman ini atau dari kondisi operasi itu melanggar batas arus. (Mumtaz, A. F. 2020)

Stabilitas tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan. Stabilitas tegangan memiliki dua klasifikasi berdasarkan gangguan:

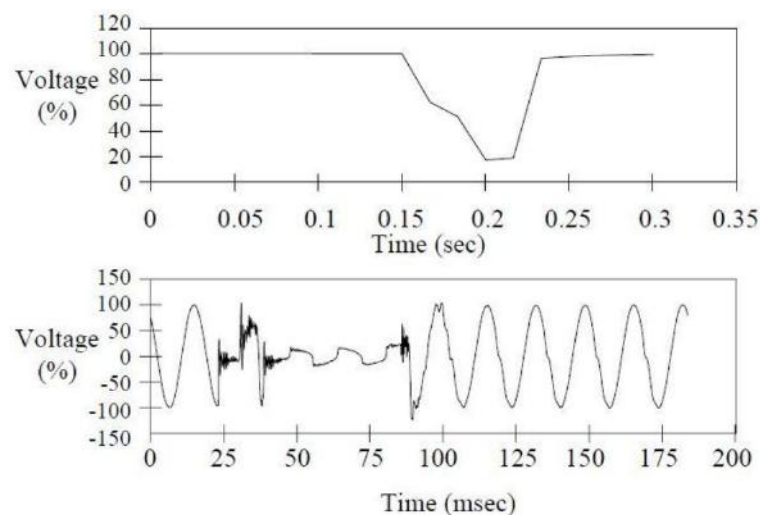
1. Stabilitas tegangan gangguan besar merupakan kemampuan sistem mengatur tegangan setelah terjadinya gangguan yang besar seperti kegagalan sistem, hilangnya pembangkitan, atau kontingensi sirkuit. Kriteria dikatakan stabil adalah tegangan pada setiap busbar dapat mencapai nilai *steady state* yang diperbolehkan.

2. Stabilitas tegangan gangguan kecil merupakan kemampuan sistem untuk mengatur tegangan setelah terjadinya gangguan kecil seperti perubahan penambahan beban sistem. Kriteria dikatakan stabil adalah ketika setiap busbar pada sistem dalam keadaan beroperasi, nilai tegangannya akan bertambah seiring dengan bertambahnya daya reaktif yang diinjeksikan. (Atmojo, T. 2023)

2.4 Jenis – jenis Masalah pada Kestabilan Tegangan

2.4.1 Voltage Sag

Voltage sag atau sag tegangan terjadi bila level tegangan RMS mengalami penurunan sebesar 10% sampai dengan 90% dari nominalnya dengan durasi $\frac{1}{2}$ cycle sampai 1 menit. Sag tegangan diklasifikasikan sebagai gangguan singkat. Mengacu pada IEEE 1159- 1995, penggunaan istilah sag memiliki arti tegangan mengalami penurunan sebesar presentase dari nilai normalnya. Sebagai contoh sag 30%, memiliki arti tegangan mengalami penurunan ke level 30% dari nilai normalnya.



Gambar 3 Bentuk gelombang tegangan saat terjadi Sag

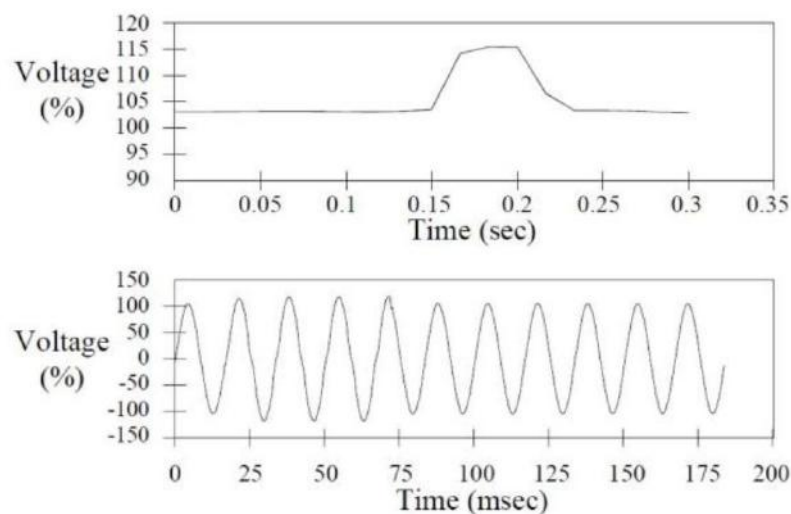
Sag tegangan dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan durasinya :

- Instaneous ($\frac{1}{2}$ - 30 cycle)
- Momentary (30 cycle – 3 detik)
- Temporary (3 detik - 1 menit)

Pembagian kategori dihubungkan dengan waktu operasi peralatan pengaman yang direkomendasikan oleh organisasi teknis internasional. Sag tegangan adalah gangguan kualitas daya yang umum terjadi dan sebuah masalah yang penting yang berdampak pada konsumen baik industri maupun komersil dimana gangguan sag tegangan tidak dapat diamati dengan melihat dari kedipan lampu, namun karena hal ini beberapa proses dalam industri dapat berhenti. Dampak dari sag tegangan dapat menyebabkan sistem mengalami shutdown atau dapat menurunkan efisiensi dan umur dari peralatan listrik terutama motor listrik.

2.4.2 Voltage Swell

Voltage swell atau swell tegangan terjadi bila level tegangan RMS naik ke 110% sampai dengan 180% dari nilai nominalnya dengan durasi $\frac{1}{2}$ cycle sampai 1 menit. Swell tegangan diklasifikasikan sebagai gangguan singkat. Mengacu pada IEEE 1159-1995, penggunaan istilah swell memiliki arti tegangan mengalami kenaikan sebesar presentase dari nilai normalnya. Swell tegangan selalu bernilai lebih dari 100% dari nilai normalnya. Sebagai contoh, bila terjadi swell 130% memiliki arti bahwa tegangan sedang mengalami peningkatan ke level 130% dari nilai normalnya.



Gambar 4 Bentuk gelombang tegangan saat terjadi Swell

Swell tegangan dapat disebabkan oleh gangguan satu fasa ke tanah dan pelepasan beban dengan jumlah yang besar dalam satu waktu. Pada gangguan satu fasa ke tanah dapat menyebabkan kenaikan tegangan di fasa yang tidak diketanahkan.

Dampak dari swell tegangan memiliki peluang lebih besar bersifat destruktif. Mampu merusak komponen suplai daya dari peralatan secara berangsur namun bersifat akumulatif, panas berlebih yang kemudian menyebabkan shutdown, kerusakan pada peralatan elektronik dan perangkat lainnya yang sensitif terhadap swell tegangan

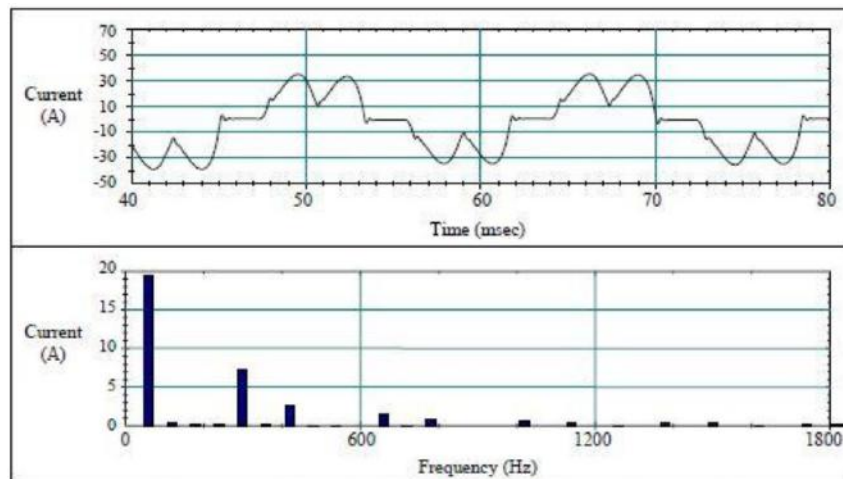
2.4.3 Harmonisa

Harmonisa adalah tegangan atau arus sinusoidal yang memiliki frekuensi kelipatan integer dari dasar sistem (50 Hz atau 60 Hz). Hal ini berarti bila pada sistem 50 Hz, frekuensi harmonisanya adalah 100 Hz (harmonisa ke-2), 150 Hz (harmonisa ke-3), dan seterusnya. Harmonisa yang muncul bersama komponen dasar dari arus atau tegangan akan menghasilkan distorsi gelombang.

Kehadiran harmonisa diakibatkan dari karakter nonlinear sebuah peralatan dan beban pada sistem tenaga. Harmonisa dapat digambarkan dengan sebuah alat yang menghasilkan arus harmonisa ke dalam sistem tenaga. Distorsi tegangan terjadi karena arus tersebut mengakibatkan drop tegangan pada impedansi sistem. Bila harmonisa dikombinasikan dengan tegangan dan arus pada keadaan normal akan menghasilkan bentuk sinyal non-sinusoidal yang kemudian akan terjadi distorsi pada gelombang. Bentuk sinyal non-sinusoidal merupakan hasil dari penjumlahan dari beberapa sinyal sinusoidal dengan magnitude, sudut fasa, dan frekuensi yang berbeda serta merupakan kelipatan dari frekuensi sistem.

Harmonisa menjadi hal yang terus menjadi perhatian untuk konsumen dan keseluruhan sistem tenaga akibat dari meningkatnya penggunaan peralatan elektronika daya. Tingkat distorsi dari harmonisa dapat dilihat dari spektrum harmonisa dengan magnitude dan sudut fasanya untuk setiap komponen harmonisa. THD (Total Harmonic Distortion) merupakan satuan dari magnitudo distorsi harmonisa.

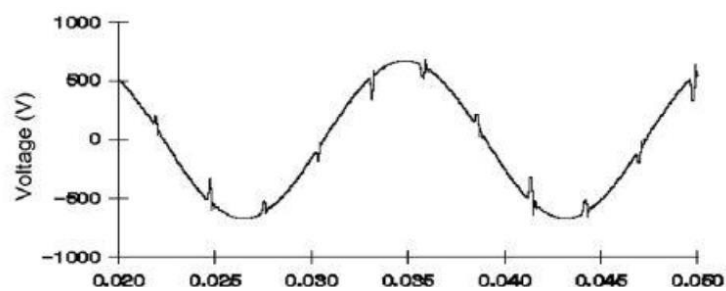
Dampak umum yang diakibatkan oleh harmonisa adalah timbulnya panas berlebih pada peralatan dan kabel. Pada harmonisa dengan tingkat yang tinggi mengakibatkan : interferensi elektromagnetik dengan sistem komunikasi, penurunan efisiensi pada mesin listrik, error pada alat pengukuran, dan lain sebagainya.



Gambar 5 Bentuk gelombang Voltage Swell

2.4.4 Notching

Notching adalah gangguan pada bentuk tegangan yang bersifat periodik diakibatkan oleh operasi perangkat elektronika daya saat arus berkomutasi dari satu fasa ke fasa lainnya. *Notching* memiliki komponen frekuensi tinggi juga bersifat periodik, sehingga notching dapat dianggap sebagai transien dan harmonisa. Sifat periodic dari *notching* dapat dilihat pada spektrum harmonisa pada tegangan terdampak. Namun komponen frekuensi pada *notching* cukup tinggi dan mungkin tidak dapat diamati dengan peralatan yang biasa digunakan untuk menganalisa kasus harmonisa. Konverter tiga fasa menghasilkan output dc yang merupakan penyebab utama dari *notching*.



Gambar 6 Bentuk gelombang Notching

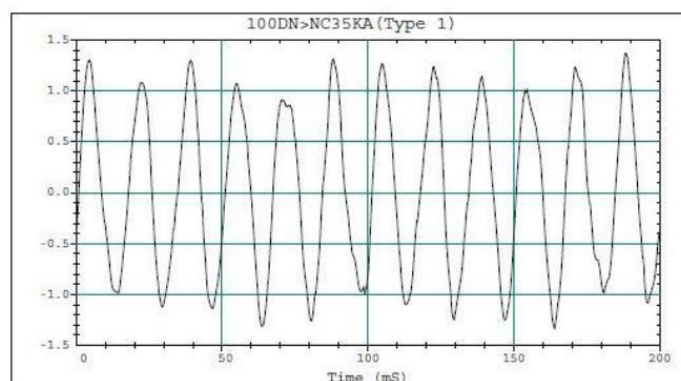
2.4.5 Flicker

Fluktuasi tegangan merupakan variasi yang bersifat sistematis dari perubahan tegangan secara acak, dalam ANSI C84.1 dikatakan bahwa magnitudonya berada di nilai 0.95 pu sampai 1.05 pu. Hal ini memiliki dampak visual berupa perubahan nyala dari sebuah lampu yang dapat kita amati, fenomena fluktuasi tegangan ini disebut *flicker*. *Flicker* adalah dampak dari fluktuasi tegangan pada penerangan akibat dari perubahan beban pada sistem yang berlangsung secara cepat. Dengan magnitude sebesar 0.25 pu dengan rentang frekuensi 6 Hz sampai 8 Hz, flicker pada sistem penerangan dapat kita amati.

Flicker memiliki efek yang signifikan pada lingkungan kerja karena dapat mengganggu konsentrasi dari pekerja yang dibantu dengan sistem penerangan. Selain itu juga dapat berdampak pada beberapa peralatan listrik yang sensitif terhadap *flicker* seperti memicu unit UPS ke mode baterai dan peralatan listrik yang membutuhkan suplai tegangan konstan. Beberapa peralatan yang dapat menyebabkan fluktuasi tegangan antara lain *electric arc furnace*, *static frequency converters*, *cycloconverter*, dan motor berkapasitas besar.

Penyebab lain yang bukan disebabkan oleh peralatan yang telah disebutkan adalah :

- *Switching* kapasitor, on load tap changer (OLTC), step voltage regulator dan peralatan lain yang mengubah komponen induktif dari impedansi sumbernya.
- Terjadi ketidakstabilan pada sistem pembangkitan (contoh : PLTB)
- Interharmonisa tegangan frekuensi rendah.



Gambar 7 Bentuk tegangan *Flicker*

(Firdaus, 2019)

2.5 Upaya Menangani Masalah Kestabilan Tegangan

Beberapa metode dapat digunakan untuk mengurangi masalah kestabilan tegangan antara lain:

a. Pembangkit yang harus beroperasi

Mengoperasikan generator cadangan (*back up supply*) untuk menyediakan dukungan tegangan selama keadaan darurat atau ketika saluran baru atau transformator terlambat beroperasi.

b. Kapasitor Seri

Penggunaan kapasitor seri bertujuan untuk seolah-olah memperpendek saluran listrik yang panjang yang berarti mengurangi rugi daya reaktif. Selain itu, saluran listrik tersebut dapat mengirim daya reaktif yang lebih banyak menuju daerah yang kekurangan suplai daya reaktif.

c. Kapasitor Paralel

Walaupun penggunaan kapasitor paralel yang banyak dapat menjadi bagian dari masalah kestabilan tegangan, terkadang kapasitor tambahan juga dapat menyelesaikan masalah dengan menggantikan fungsi cadangan daya reaktif berputar pada generator. Pada umumnya, hampir seluruh kebutuhan daya reaktif disuplai secara lokal, sedangkan generator hanya menyuplai daya aktif.

d . Kompensator Statis (SVC dan STATCOM)

Kompensator statis, pasangan kondenser sinkron berdasarkan elektronika daya, efektif dalam mengendalikan tegangan dan mencegah *voltage collapse* tetapi memiliki banyak keterbatasan yang harus diketahui. *Voltage collapse* yang terjadi pada sistem bergantung pada kompensator statis ketika sebuah gangguan yang melebihi kriteria perencanaan menyebabkan kompensator mencapai batasnya.

e. Operasi pada Tegangan yang Lebih Tinggi

Operasi pada tegangan yang lebih tinggi tidak meningkatkan cadangan mempertahankan generator jauh dari batas daya reaktifnya dan hal tersebut membantu operator untuk menjaga kendali tegangan. Perbandingan dari kurva

Q-V pada sisi penerima untuk dua sisi pengirim menunjukkan nilai tegangan yang lebih besar.

f. Pelepasan Beban *Undervoltage*

Sedikit pengurangan beban, walaupun sebesar 5% hingga 10% dapat membuat perbedaan yang signifikan antara collapse atau bertahan. Saat ini, pelepasan beban manual digunakan untuk tujuan ini (beberapa *utility* menggunakan pengurangan tegangan distribusi melalui SCADA), walaupun mungkin kurang efektif karena terlalu lambat jika terdapat kekurangan daya reaktif yang cukup besar. *Undervoltage* rele *invers time* jarang digunakan, tetapi dapat menjadi sangat efektif. Pada sebuah jaringan radial, pelepasan beban didasarkan pada tegangan sisi primer. Pada masalah kestabilan keadaan tunak, pelepasan beban pada sisi penerima akan lebih efektif walaupun mungkin tegangan paling rendah berada didekat pusat beban.

g. Faktor Daya Generator yang Lebih Rendah

Ketika pembangkitan baru cukup dekat dengan daerah yang mungkin membutuhkan cadangan daya reaktif yang besar, faktor daya generator sebesar 0,8 atau 0,85 terkadang mungkin lebih sesuai. Akan tetapi, kapasitor dengan sebuah faktor daya generator yang tinggi dimana generator tersebut memiliki kemampuan beban lebih daya reaktif akan lebih fleksibel dan ekonomis.

h. Menggunakan Kemampuan Beban Lebih Daya Reaktif Generator

Generator harus digunakan seefektif mungkin. Kemampuan beban lebih dari generator dan eksiter dapat digunakan untuk menunda *voltage collapse* hingga operator dapat mengubah pengiriman atau membatasi beban ketika terjadi beban lebih (*overload*). Akan lebih baik jika kemampuan beban lebih didefinisikan lebih lanjut, operator dilatih untuk menggunakannya, dan divais proteksi diatur agar tidak mencegah penggunaannya.

(Hasmudi, N. K. 2020)

2.6 FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan aspek penting yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga. Sistem tenaga listrik

harus dioperasikan dengan tujuan mempertahankan daya saluran dan tegangan pada setiap bus berada pada batas operasinya. Perubahan daya reaktif menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada sistem seperti ketidakstabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi-rugi daya semakin besar ketika sistem beroperasi pada beban maksimum. Dalam kondisi ini, sistem dapat distabilkan dengan mengurangi daya reaktif beban atau menyediakan sumber daya reaktif seperti bank kapasitor atau peralatan *flexible AC transmission systems* (FACTS). Peralatan FACTS memiliki beberapa kemampuan antara lain meningkatkan fleksibilitas operasi, kestabilan sistem kelistrikan, dan pemanfaatan jaringan eksisting yang sudah ada.

Perangkat FACTS yang umum digunakan antara lain *thyristor controlled series compensator* (TCSC), *static VAR compensator* (SVC), *static compensator* (STATCOM), dan *unified power flow controller* (UPFC). Peralatan FACTS yang memiliki kemampuan untuk meningkatkan stabilitas tegangan statis yaitu SVC dan TCSC. Sedangkan UPFC dan STATCOM mampu meningkatkan loading parameter dan injeksi MVar. Hal ini yang mendasari dipilihnya SVC, TCSC dan UPFC dalam penelitian ini. Perangkat FACTS telah banyak digunakan untuk stabilitas tegangan dan kompensasi daya reaktif mengendalikan aliran daya dan meningkatkan kestabilan dinamis. Pentingnya pemasangan peralatan FACTS pada sistem tenaga listrik, karena peralatan FACTS mampu meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik, meningkatkan kualitas daya, menurunkan losses pada sistem, dan meningkatkan loading parameter sistem.

Dalam rangka mengoptimalkan dan memperoleh manfaat terbaik dari penggunaan perangkat FACTS, perlu untuk mempertimbangkan tiga hal utama sebagai berikut:

- 1) jenis pengendali FACTS yang harus digunakan,
- 2) *setting* dari pengendali FACTS, dan
- 3) lokasi terbaik dari FACTS pengendali dalam sistem transmisi.

(Zainal Abidin, S. P. (2014))

2.7 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

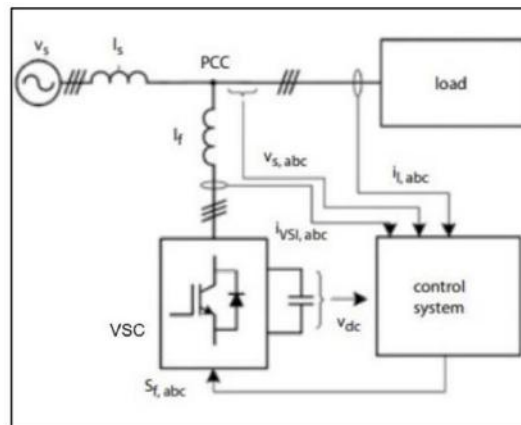
2.7.1 Konsep dasar STATCOM

Static Synchronous Compensator (STATCOM) merupakan salah satu kompensator *Shunt* dari *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) yang terdiri dari peralatan elektronika daya yang dapat mengatur aliran daya dan meningkat stabilitas transient sistem daya pada sistem tenaga listrik. STATCOM mengatur tegangan pada sistem transmisi dengan mengendalikan jumlah daya reaktif yang disuntikkan ke atau diserap dari sistem daya. Apabila tegangan lebih rendah dari tegangan nominal sistem, maka STATCOM akan menyuplai daya reaktif (STATCOM kapasitif). Namun sebaliknya, apabila tegangan lebih tinggi daripada tegangan nominal sistem maka STATCOM akan menyerap daya reaktif (STATCOM induktif). (Rifaldi Hazbullah, 2022)

STATCOM sering dianggap sebagai evolusi dari peralatan Static Var Compensator (SVC), salah satu contoh FACTS tambahan. Ini disebabkan oleh fakta bahwa STATCOM dan SVC memiliki prinsip kerja dan sistem pemasangan yang sama. STATCOM menggunakan prinsip dasar pengubah voltase yang berasal dari tegangan (VSC), di mana tegangan DC diubah menjadi tegangan tiga fasa dengan nilai, frekuensi, dan sudut fasa yang ditentukan. Perangkat STATCOM terdiri dari kapasitor DC yang berfungsi sebagai saklar dengan kecepatan tinggi dan terhubung secara shunt ke saluran AC. STATCOM adalah divais FACTS yang memiliki kemampuan untuk mengatur aliran daya reaktif secara independen dari parameter sistem lainnya. (Achmad Bashori Kurniawan, 2024)

2.7.2 Kontruksi STATCOM

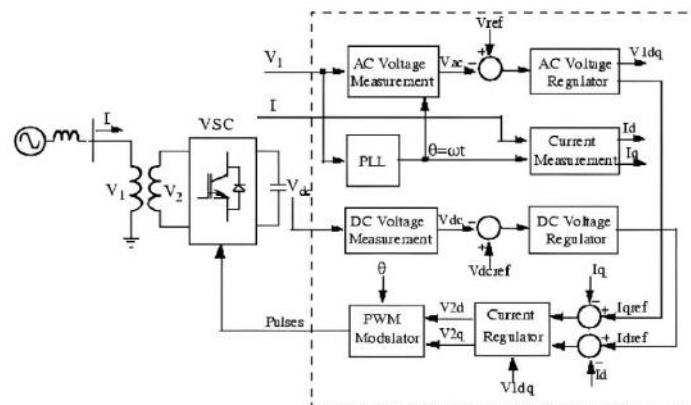
STATCOM adalah komponen shunt dari sistem transmisi AC fleksibel (FACTS), yang terdiri dari perangkat elektronik daya. Tugasnya adalah mengatur aliran daya dan pada saat yang sama meningkatkan stabilitas sistem tenaga.



Gambar 8 Struktur dasar STATCOM

Setiap elemen STATCOM terdiri dari Voltage Source Converter (VSC), kapasitor DC, dan sistem kontrol. VSC adalah perangkat konverter daya elektronik yang bertugas mengubah tegangan DC input menjadi tegangan AC output. Saat menyerap daya reaktif, kapasitor DC juga berfungsi sebagai sumber daya dan penyimpan energi. (Achmad Bashori Kurniawan, 2024)

Sistem kontrol pada STATCOM digunakan untuk memberikan sinyal pada *Voltage Source Converter* (VSC) yang akan mengatur besarnya daya reaktif yang akan disalurkan atau diserap oleh STATCOM. Sistem kontrol juga akan menjaga tegangan VSC agar sefasa dengan tegangan sistem. Sistem kontrol pada STATCOM ditunjukkan pada Gbr



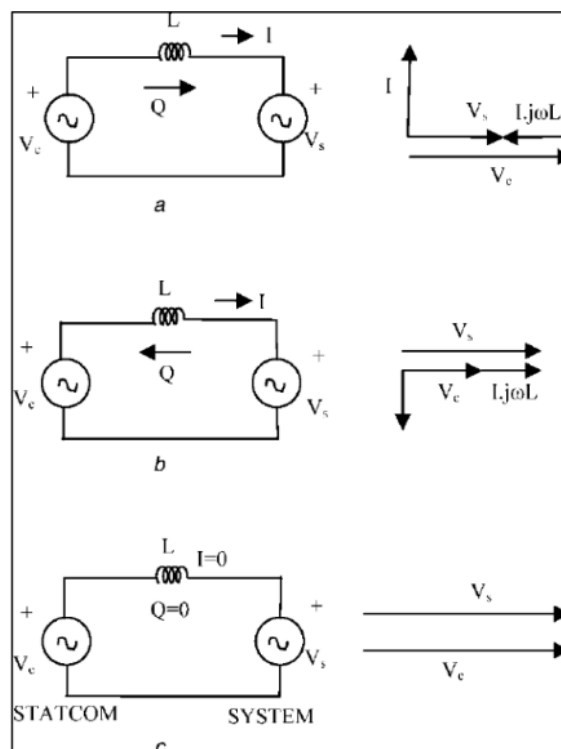
Gambar 9 Diagram Garis tunggal dari STATCOM dan Diagram Blok Sistem Kontrolnya

2.7.3 Prinsip Kerja STATCOM

Untuk prinsip kerja dari STATCOM, nilai kompensasi pada STATCOM ditentukan dengan besar dari nilai reaktif yang beroperasi pada sistem dan digunakan sebagai masukan. Proses pengendalian pada daya reaktif tersebut dilakukan dengan memasukan nilai tegangan kapasitor pada sistem dan tegangan dari kapasitor yang telah ditentukan. Penggabungan pengendalian daya reaktif dan tegangan kapasitor akan digunakan sebagai sinyal penyaklaran yang memiliki fungsi untuk menentukan besar tegangan STATCOM untuk pengaturan daya reaktif pada rangkaian converter. STATCOM memiliki 3 jenis operasi kerja sebagai berikut:

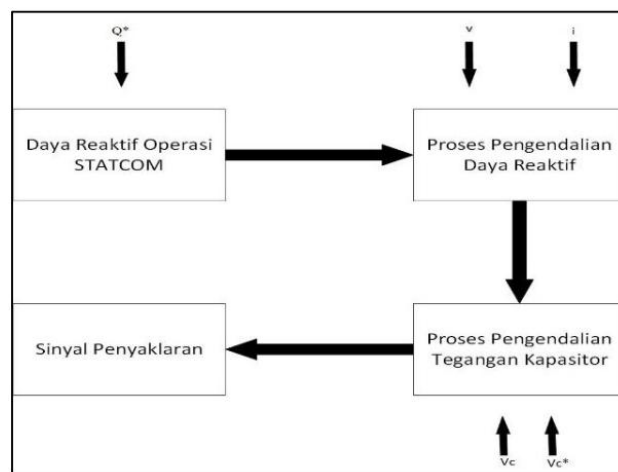
- Keadaan Kapasitif
- Keadaan Induktif
- Keadaan tanpa beban

Suatu keadaan dimana STATCOM tidak membangkitkan maupun menyerap daya reaktif dan nilai V_S sama dengan V_C merupakan hal yang disebut dengan keadaan tanpa beban.



Gambar 10 Prinsip kerja STATCOM dimana a) keadaan operasi kapasitif, b) keadaan operasi induktif, c) keadaan operasi tanpa beban

Pada Gambar 10 menunjukkan prinsip kerja dari STATCOM. Apabila STATCOM berada pada keadaan kapasitif ($V_C > V_S$), STATCOM akan beranggapan bahwa ada reaktansi induktif pada sisi terminal dan mengakibatkan daya reaktif akan mengalir ke sistem dari STATCOM. Sebaliknya apabila STATCOM berada dalam kondisi mode induktif, nilai $V_S > V_C$ maka STATCOM akan mengidentifikasi sistem sebagai reaktansi kapasitif dan berakibat daya reaktif dari sistem mengalir menuju STATCOM. Adapun untuk bentuk alur sederhana dari pengendalian STATCOM ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Proses pengendalian STATCOM

(Cut Raissa Shabira, 2022)

2.7.4 Keunggulan STATCOM

Fluktuasi daya reaktif selama ini diantisipasi hanya dengan menambahkan peralatan Kapasitor yang bisa menghasilkan daya reaktif yang diperlukan oleh bus beban. Akan tetapi kapasitor mempunyai impedansi atau hambatan yang rendah pada frekuensi yang tinggi, karena arus listrik cenderung mengalir melalui lintasan yang hambatannya rendah maka arus harmonisa cenderung mengalir melalui kapasitor. Akibatnya, kapasitor mudah rusak karena mengalami arus lebih akibat adanya harmonisa. Daya reaktif (Q) yang tidak sesuai keinginan pada sistem berdampak pada penurunan kinerja sistem transmisi. Hal ini akan mempengaruhi jumlah daya nyata (S) yang akan digunakan beban dan ikut menentukan besarnya faktor daya yang bekerja pada sistem. Perlunya mengantisipasi kejadian tersebut

maka dibutuhkan peralatan kendali kompensator daya reaktif yang memiliki keandalan yang tinggi. Salah satu peralatan kompensator untuk saluran transmisi. FACTS Devices yaitu *Static Synchronous Compensator* (STATCOM).

STATCOM dikategorikan sebagai teknologi baru dalam bidang kompensator daya reaktif. STATCOM mampu menghasilkan nilai harmonik yang kecil dan nilai tegangan AC yang terkendali sebagai outputnya. Nilai-nilai tersebut dapat mempengaruhi nilai-nilai daya reaktif. Selain itu STATCOM juga mampu berfungsi untuk mengkompensasi beberapa masalah lain seperti *flicker*, impedansi hantaran pada sistem transmisi, dan perbedaan sudut fasa. Kendali daya reaktif oleh STATCOM terjadi dengan cara membandingkan besarnya nilai tegangan terminal antara STATCOM dengan sistem. Apabila tegangan STATCOM bernilai lebih rendah maka STATCOM akan menyerap daya reaktif pada sistem. Apabila bernilai lebih tinggi dari sistem maka akan menghasilkan daya reaktif ke sistem. (Muammar Zainuddin, F. E. 2015).

Selain itu, karena STATCOM adalah peralatan FACTS (*Flexible AC Transmission System*) yang dirancang untuk meningkatkan stabilitas tegangan dalam sistem tenaga listrik, maka pemasangan STATCOM pada sistem dapat mengatasi gangguan tegangan seperti Sag (penurunan tegangan), Swell (kenaikan tegangan) dan *Overvoltage* dan *Undervoltage* karena STATCOM dapat menyuplai daya reaktif ke jaringan saat terjadi penurunan tegangan dan dapat menyerap daya reaktif dari jaringan untuk menurunkan tegangan ke level yang aman serta dengan kemampuan dinamisnya STATCOM mampu menjaga tegangan tetap stabil disekitar nilai nominal secara *real-time*.

2.8 Voltage Stability Indices (VSIs)

Voltage Stability Indices (VSI) sangat berguna ketika menganalisis kondisi stabilitas tegangan PSNs (*Power System Networks*) atau jaringan sistem tenaga listrik karena telah terbukti andal, akurat, mudah digunakan, dan murah secara komputasi atau perhitungan. VSI juga memiliki kemampuan tambahan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya keruntuhan dan mengidentifikasi jalur-jalur

penting atau bus-bus dalam sistem; keunggulan seperti yang disebutkan sebelumnya ditambah dengan kemampuan ini membuatnya sangat cocok untuk analisis stabilitas tegangan secara *online*. (Samuel I. A., A. O. 2024)

Beberapa jenis VSI telah didiskusikan untuk menilai masalah dinamis dari perencanaan dan pengontrolan sistem tenaga. VSI dikategorikan menjadi dua jenis:

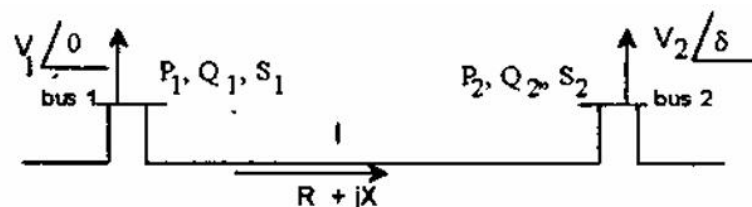
1. VSI saluran (*line*): “VSI *line* digunakan untuk mengidentifikasi kemampuan TS (*transmission system*) untuk menyalurkan daya ke area beban.” Nilai dari indeks yang ditentukan untuk setiap cabang digunakan untuk menemukan kesenjangan antara titik operasi saat ini dan daya maksimum kemampuan transfer saluran.
2. VSI bus: “Suatu indeks bus memiliki kemampuan untuk mendeteksi margin antara titik operasi bus saat ini dan maksimum pemuatan bus beban.

2.8.1 Metode VSI

Dalam VSI, terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menilai kestabilan tegangan sistem pada jaringan transmisi seperti FVSI (*Fast Voltage Stability Index*) dan NVSI (*New Voltage Stability Index*), serta pada jaringan distribusi seperti SI (*Stability Index*).

2.8.1.1 FVSI (*Fast Voltage Stability Index*)

FVSI merupakan salah satu dari metode VSI yang menghitung nilai indeks kestabilan tegangan pada suatu sistem dengan merujuk pada saluran pada sistem tersebut. pada Gambar 6.



Gambar 12 Representasi Model Bus

Keterangan:

V_1, V_2 = Tegangan pada bus pengirim dan penerima

P_1, Q_1 = Daya aktif dan daya reaktif pada bus pengirim

P_2, Q_2 = Daya aktif dan daya reaktif pada bus penerima

S_1, S_2 = Daya nyata pada bus pengirim dan penerima

δ = Perbedaan sudut fasa antara bus pengirim dan penerima

Impedansi saluran dicatat sebagai $R + jX$ dengan arus yang mengalir disaluran yang dirumuskan menjadi:

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \quad (1)$$

V_1 diambil sebagai referensi, dan oleh karena itu sudutnya digeser menjadi 0. Daya semu pada bus 2 dapat ditulis sebagai;

$$S_2 = V_2 I^* \quad (2)$$

Mengatur ulang Persamaan (2), dengan hasil;

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^* \quad (3)$$

$$I = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (4)$$

Menyamakan Persamaan (1) dan (4) sehingga diperoleh;

$$\frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta}$$

$$V_1 V_2 \angle -\delta - V_2^2 \angle 0 = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (5)$$

Memisahkan bagian nyata dan imajiner menghasilkan;

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R P_2 + X Q_2 \quad (6)$$

Dan

$$-V_1 V_2 \sin \delta = X P_2 - R Q_2 \quad (7)$$

Mengatur Persamaan (7) untuk P_2 dan disubstitusi dengan Persamaan (6) menghasilkan persamaan kuadrat dari V_2 ;

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1 V_2 + \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 = 0 \quad (8)$$

Akar untuk V_2 yaitu,

$$V_2 = \frac{\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1 \pm \sqrt{\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1\right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2}}{2} \quad (9)$$

Untuk mendapatkan akar nyata untuk V , diskriminan diatur lebih besar dari atau sama dengan '0' yaitu,

$$\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_1\right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q_2 \geq 0$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (10)$$

Karena δ secara nominal sangat kecil, maka;

$$\delta \approx 0, R \sin \delta \approx 0 \text{ dan } X \cos \delta \approx X$$

Mengambil simbol ' i ' sebagai bus pengirim dan ' j ' sebagai bus penerima. Oleh karena itu, indeks kestabilan tegangan cepat (FVSI) dapat didefinisikan sebagai;

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (11)$$

Keterangan:

Z = impedansi saluran

X = reaktansi saluran

Q_j = daya reaktif sisi penerima

V_i = tegangan sisi pengirim

Nilai FVSI yang dievaluasi mendekati 1.00 menunjukkan bahwa saluran tertentu berada pada kondisi ketidakstabilannya yang dapat menyebabkan keruntuhan tegangan di seluruh sistem. Untuk mempertahankan kondisi yang aman, nilai FVSI harus dipertahankan dengan nilai kurang dari 1.00.

2.8.2 Penerapan VSI

Indeks stabilitas tegangan memainkan peran penting dalam menilai dan mengelola tegangan dalam sistem daya pada dunia nyata. Indeks ini memberikan ukuran kuantitatif stabilitas sistem dan digunakan dalam berbagai aplikasi untuk memastikan operasi yang aman dan andal. Berikut ini adalah beberapa aplikasi umum dari stabilitas tegangan indeks dalam skenario dunia nyata.

a. Penilaian Stabilitas Tegangan

Indeks stabilitas tegangan digunakan untuk menilai tegangan stabilitas sistem daya di bawah kondisi operasi yang berbeda. Indeks ini memberikan ukuran kuantitatif dari kedekatan sistem dengan jatuh atau ketidakstabilan tegangan. Dengan menganalisis indeks ini, sistem operator dan perencana dapat mengidentifikasi titik operasi kritis, tegangan batas stabilitas, dan skenario potensi keruntuhan tegangan.

b. Perencanaan dan Peluasan Sistem

Indeks stabilitas tegangan digunakan dalam perencanaan sistem dan studi ekspansi untuk memastikan keandalan dan keamanan jangka panjang dari sistem tenaga. Indeks ini membantu menentukan beban maksimum atau tingkat pembangkitan yang dapat didukung tanpa masalah kestabilan tegangan. Dengan memasukkan pertimbangan stabilitas tegangan kedalam studi perencanaan, operator sistem dapat membuat keputusan yang tepat mengenai penguatan sistem, peningkatan jaringan, dan kapasitas perluasan untuk mengurangi masalah stabilitas tegangan.

c. Analisis Kontingensi

Indeks stabilitas tegangan digunakan dalam analisis kontingensi untuk mengevaluasi dampak kontingensi, seperti pemadaman generator atau pemadaman saluran transmisi pada kestabilan tegangan. Dengan menghitung indeks ini untuk berbagai skenario kontingensi, operator dapat mengidentifikasi kontingensi kritis yang dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan dan mengambil tindakan pencegahan atau perbaikan yang tepat seperti pelepasan beban atau pelepasan berulang, untuk menjaga kestabilan sistem.

d. Pemantauan dan Kontrol *Online*.

Indeks stabilitas tegangan digunakan untuk pemantauan waktu nyata dan kontrol sistem daya. Dengan menghitung indeks ini secara terus menerus berdasarkan pengukuran waktu nyata, operator dapat mendeteksi dan mengidentifikasi kondisi stabilitas tegangan yang memburuk dalam sistem. Ini memungkinkan untuk implementasi tindakan kontrol yang tepat waktu, seperti kontrol daya reaktif, pengaturan tegangan, dan pelepasan beban, untuk menjaga kestabilan tegangan dengan batas yang dapat diterima.

e. Skema Tindakan Perbaikan.

VSI digunakan dalam desain dan pengoperasian skema tindakan atau RAS (*Remedial Action Schemes*). RAS adalah sistem kontrol otomatis yang merespon ketidakstabilan tegangan dengan mengambil tindakan korektif yang telah ditentukan. Indeks ini berfungsi sebagai pemicu untuk mengaktifkan RAS tertentu, seperti perangkat kontrol tegangan yang bekerja cepat, bank kapasitor, atau generator padam, untuk mencegah jatuhnya tegangan atau mengurangi masalah kestabilan tegangan.

f. Penilaian Keamanan Dinamis.

VSI diintegrasikan kedalam alat penilaian keamanan dinamis alat penilaian untuk mengevaluasi respon dinamis sistem dibawah berbagai gangguan atau kontingensi. Alat-alat ini memanfaatkan pengukuran waktu nyata dan model dinamis untuk menilai stabilitas transien sistem dan kestabilan tegangan. VSI memberikan informasi berharga bagi operator untuk membuat keputusan penting selama situasi darurat atau proses pemulihan sistem. (Guru Mohan Baleboina, R. M. 2023)

2.9 Metode Analisis Ekonomi

2.9.1 *Benefit Cost Ratio* (BCR)

Benefit Cost Ratio merupakan salah satu metode analisis evaluasi investasi yang sering digunakan. Pada metode ini, perhitungan ditekankan kepada manfaat (*benefit*) yang didapatkan dan pengorbanan (*cost*) yang dikeluarkan dalam investasi.

Dengan begitu, secara umum *Benefit Cost Ratio* adalah ukuran yang menggambarkan apakah investasi yang dilakukan menguntungkan atau tidak, dengan cara membandingkan antara pemasukan dan pengeluaran. Pada metode ini, nilai BCR didapat dengan menggunakan perhitungan *Present Worth Benefit* dibagi dengan *Present Worth Cost* yang didapatkan dari nilai *Equivalent Uniform Annual of Benefit* dan nilai *Equivalent Uniform Annual of Cost*.

Kriteria Keputusan yang digunakan pada analisis evaluasi dengan metode BCR adalah sebagai berikut:

$BCR > 1$, investasi tersebut layak untuk dilakukan (menguntungkan)

$BCR < 1$, investasi tersebut tidak layak untuk dilakukan (merugikan)

$BCR = 1$, investasi tersebut tidak menguntungkan dan merugikan

2.9.2 Payback Period (PBP)

Payback Period (PBP) merupakan metode yang menghitung berapa lama investasi *Break Event Point* (BEP) atau dengan kata lain, berapa lama modal kembali. Semakin cepat investasi balik modal, keuntungan akan semakin banyak karena diasumsikan pendapatan pada periode setelah PBP adalah murni keuntungan.

$PBP < 15$ tahun, investasi tersebut layak untuk dilakukan (menguntungkan)

$PBP > 15$ tahun, investasi tersebut tidak layak untuk dilakukan (merugikan)

$PBP = 15$ tahun, investasi tersebut tidak menguntungkan dan tidak merugikan

(Muhammad Faisal Ibrahim, 2020)