

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas jaringan didefinisikan sebagai sifat jaringan yang memungkinkannya tetap dalam kesetimbangan dalam kondisi operasi normal dan untuk mendapatkan kembali keseimbangan setelah gangguan. Sistem kelistrikan yang baik harus memenuhi beberapa syarat, yaitu [16]:

1. *Reliability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *Stability* adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Sistem akan jatuh ke dalam ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau ketika terjadi perubahan kondisi sistem karena penurunan tegangan. Kestabilan sistem catu daya merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan energi ke konsumen. Masalah stabilitas yang sering muncul di sini adalah masalah kelebihan beban, catu daya yang berkurang secara bertahap akan membuat sistem mengalami penurunan tegangan dan skenario terburuknya adalah pemadaman listrik. Oleh karena itu setiap sistem tenaga listrik diharapkan dapat mempertahankan stabilitas tegangannya untuk menjaga ketersediaan suplai listrik secara kontinu dengan kualitas daya yang baik.

Berdasarkan sifat dan besarnya gangguan, analisis kestabilan digolongkan menjadi tiga jenis yaitu, kestabilan keadaan dinamis, kestabilan tetap, kestabilan transien.

1. Kestabilan keadaan dinamis merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil setelah menerima gangguan besar dan waktunya lebih lama. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan dalam sistem yang lebih kompleks, karena memasukkan komponen kendali otomatis dalam perhitungannya [16].

2. Kestabilan tetap merupakan kemampuan dari sistem catu daya untuk menjaga sinkronisasi antara mesin sistem dan saluran eksternal selama perubahan beban normal atau lambat dan gangguan kecil. *Stabilitas steady state* bergantung kepada komponen transmisi, kapasitas pembangkitan, beban, dan efektifitas perangkat kendali [16].
3. Kestabilan transien merupakan kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk kembali setelah mengalami gangguan yang besar secara tiba-tiba. Gangguan ini dapat berupa hilangnya beban yang besar secara tiba-tiba. Setelah mengalami gangguan generator akan kembali pada keadaan *transien* lalu berangsur-angsur pulih kedalam keadaan serempak dalam kestimbangan yang baru, apabila sistem menerima gangguan diluar batas kemampuannya akan terjadi kehilangan kestabilannya [16].

2.2. Kestabilan Tegangan

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 [17]. Stabilitas tegangan memiliki dua klasifikasi berdasarkan gangguan [17]:

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 keadan beroperasi, nilai tegangannya akan bertambah seiring dengan bertambahnya daya reaktif yang diinjeksikan.

2.3. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan IEEE *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori yaitu [18]:

1. Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem tenaga listrik untuk menjaga kesinkronan setelah mengalami gangguan. Stabilitas sudut rotor ini bergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanikal pada setiap generator pada suatu sistem tenaga.
2. Kestabilan frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga frekuensi dalam batas nominal setelah terjadi gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkit dan beban.
3. Kestabilan tegangan dapat diartikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan nilai tegangannya di semua bus pada sistem dalam kondisi operasi normal maupun setelah terjadi gangguan.

2.4. Tegangan Jatuh

Tegangan jatuh adalah penurunan tegangan terus menerus karena gangguan, yang dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan seluruh sistem kelistrikan. Tegangan jatuh dapat terjadi pada saat daya pembangkit masih lebih tinggi dari daya beban yang dibutuhkan, namun karena gangguan sistem, tidak memungkinkan untuk menyeimbangkan daya antara daya pembangkit dan daya beban, hal ini menyebabkan tegangan jatuh. Sistem untuk mencegah tegangan jatuh sangat penting agar mencegah terjadinya hal tersebut dengan cara menentukan karakteristik serta lokasi dari beban yang akan dilepaskan untuk membuat tegangan stabil kembali .

2.5. Standar Undervoltage

Undervoltage adalah penurunan nilai efektif dari tegangan yang nilainya kurang dari 90% dari tegangan normal dan berlangsung lebih dari satu menit. *Undervoltage* biasanya disebabkan oleh kejadian gangguan atau beban yang

berlebihan, atau pada saat keadaan beban lebih besar dari kapasitas daya yang dihasilkan, sehingga terjadi *undervoltage* [19]. Tegangan sistem harus dijaga dalam batas-batas berikut [5]:

Tegangan Nominal Kondisi Normal

- a. 500 kV +5%, -5%
- b. 150 kV +5%, -10%
- c. 70 kV +5%, -10%
- d. 20 kV +5%, -10%

2.6. Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih pada suatu sistem tenaga listrik terjadi akibat adanya pembangkit yang menyuplai daya keluar dari sistem interkoneksi dengan pembangkit lainnya dan penambahan daya beban yang besar secara mendadak sehingga mengakibatkan jumlah daya yang dihasilkan generator dan jumlah daya beban yang digunakan tidak seimbang. Ketidakseimbangan daya tersebut dapat mengakibatkan frekuensi dari generator semakin lama semakin turun dan apabila dibiarkan akan merusak generator yang lainnya [20].

Kondisi tidak normal sehingga terjadinya beban lebih pada umumnya disebabkan oleh beberapa hal, antara lain [20]:

1. Adanya pembangkit yang padam dalam sistem interkoneksi sehingga mengakibatkan suplai daya yang seharusnya disuplai berkurang dan akan ditanggung oleh pembangkit lain yang masih operasi.
2. Adanya gangguan pada saluran transmisi sehingga ada beberapa beban yang tidak dapat disuplai oleh salah satu pembangkit dalam sistem interkoneksi.
3. Penambahan daya beban yang besar secara mendadak pada sistem interkoneksi.

Penurunan frekuensi sistem secara terus-menerus menyebabkan kegagalan sistem dan akan merusak sistem pembangkitan yang berakibat pemadaman total. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengatasi pemadaman total antara lain [20]:

1. Mengoptimalkan kapasitas pembangkit yang masih beroperasi

Pengoptimalan kapasitas daya ini dilakukan oleh governor. Jika terjadi penurunan daya keluaran hanya sekitar 10% sampai 15%, maka penurunan frekuensi terjadi secara perlahan. Governor pembangkit masih memiliki waktu untuk beroperasi dan daya cadangan panas yang ada (*spinning reserve*) sebesar 10% sampai 15% dapat digunakan dengan mengubahnya menjadi energi listrik.

2. Pelepasan beban

Ketika pengoptimalan kapasitas pembangkit yang masih beroperasi belum dapat mengatasi gangguan beban lebih, maka diperlukan suatu pelepasan beban. Pelepasan beban ini dapat dilakukan dengan cara manual dan otomatis menggunakan *under frequency relay*.

3. *Island operation*

Ketika penurunan frekuensi terjadi secara drastis dan pelepasan beban tidak mampu mengatasinya maka langkah terakhir dilakukan *island operation*. *Island operation* atau operasi pemisahan suatu unit pembangkit dilakukan bila terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan sistem mengarah ke kondisi *black out*.

Akibat dari terjadinya gangguan beban lebih pada suatu sistem interkoneksi tenaga listrik antara lain [20]:

1. Penurunan tegangan sistem.
2. Penurunan frekuensi.

Penurunan tegangan ini dapat diatasi dengan melakukan koordinasi peralatan yaitu pelepasan sementara sampai pelepasan total pengatur tegangan, pelepasan pengubah tap pada trafo, pelepasan reaktor *shunt*, dan penghubungan kapasitor dengan sistem. Turun tegangan bisa juga diakibatkan oleh adanya gangguan lain seperti misalnya gangguan hubung singkat, sehingga dalam hal ini penurunan frekuensi merupakan acuan yang lebih baik untuk melakukan pelepasan beban.

Generator memiliki spesifikasi tertentu berkaitan dengan rentang frekuensi kerja yang diizinkan beserta waktu operasi dari frekuensi tersebut. Penurunan frekuensi yang disebabkan oleh adanya beban lebih sangat membahayakan

generator. Ketika laju penurunan frekuensi menurun tajam, hal terburuk yang mungkin terjadi adalah pemadaman total. Penurunan frekuensi tidak terlalu tajam, dapat segera dilakukan pelepasan beban [20].

2.7. Pelepasan Beban

Gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya karena ada unit pembangkit yang *trip*, maka indikasi pertama adalah turunnya tegangan dan frekuensi. Kehilangan pembangkit secara mendadak dapat menyebabkan turunnya frekuensi maka untuk menghindarkan sistem menjadi *collapse* perlu dilakukan pelepasan beban.

Pelepasan beban merupakan salah satu fenomena yang terjadi di suatu sistem tenaga listrik yang mengijinkan adanya beberapa beban keluar dari sistem sehingga menghasilkan sistem tenaga listrik. Hal ini biasanya disebabkan oleh adanya beban lebih pada sistem, sehingga untuk dapat mengembalikan kondisi sistem agar seperti seperti semula diperlukan pelepasan beberapa beban tertentu. Suatu sistem tenaga listrik yang bekerja secara normal memiliki daya permintaan beban dan rugi-rugi daya transmisi [21].

Mekanisme yang dilakukan untuk menormalkan sistem yang mengalami gangguan yaitu dengan cara melepaskan beban. Penormalan tegangan sistem dilakukan untuk menanggulangi ketidakstabilan tegangan yang berupa penurunan tegangan sistem hingga melewati batas toleransi tegangan normalnya yaitu sebesar +5% dan -10% dari tegangan nominalnya.

Tujuan dilakukanya pelepasan beban yaitu untuk mengembalikan frekuensi dalam keadaan normal kembali, adapun kriteria untuk melakukan pelepasan beban antara lain [20]:

1. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap untuk tujuan jika pengurangan beban tahap pertama gagal mengembalikan frekuensi maka dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya untuk memperbaiki penurunan frekuensi.
2. Jumlah beban yang dilepaskan hendaknya seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik dalam memperbaiki penurunan frekuensi yang terjadi.

3. Beban yang dilepas adalah beban dengan prioritas paling rendah dibandingkan dengan beban lainnya pada sistem catu daya.
4. Pelepasan beban harus dilakukan dengan tepat, sehingga penundaan relai minimum harus ditentukan untuk mendeteksi penurunan frekuensi generator karena kelebihan beban atau pengaruh lainnya.

2.8. Faktor yang Mempengaruhi Ketidakstabilan Tegangan

Ketidakstabilan tegangan disebabkan oleh beberapa faktor. Adapun beberapa faktornya yaitu [17]:

1. Dapat dipicu oleh beberapa penyebab, antara lain perubahan kecil pada sistem secara bertahap, seperti kenaikan beban secara alami tanpa diikuti oleh kemampuan suplai generator atau gangguan besar secara tiba-tiba, misalnya hubung singkat dan kehilangan unit pembangkitan atau saluran dengan pembebanan yang besar.
2. Ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif beban. Biasanya runtuh tegangan terjadi pada sistem dengan kondisi saluran yang pembebanannya besar. Ketika penyaluran daya reaktif dari area terdekat susah dilakukan, sedikit kenaikan permintaan beban akan daya reaktif dapat mengakibatkan ketidakstabilan tegangan.
3. Penurunan tegangan secara perlahan dan hasil proses akumulasi yang melibatkan aksi dan interaksi dari banyak peralatan, sistem kendali, dan sistem proteksi.
4. Dipengaruhi oleh kondisi dan karakteristik sistem. Faktor-faktor yang memiliki pengaruh besar terhadap ketidakstabilan tegangan, antara lain:
 - a. Jarak yang jauh antara pembangkitan dan beban
 - b. Aksi *On Load Tap Changer* (OLTC) selama kondisi tegangan rendah
 - c. Karakteristik beban yang tidak baik
 - d. Koordinasi yang buruk antara sejumlah sistem kendali dan sistem proteksi.
5. Penggunaan kompensasi kapasitor secara berlebihan.

2.9. Prioritas Beban

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari berbagai jenis beban. Lingkungan industri beban-beban yang banyak digunakan antara lain motor-motor induksi, lampu penerangan bangunan dan jalan. Setiap jenis beban di industri memiliki nilai prioritasnya masing-masing.

Pelepasan beban diharapkan dapat mengatasi tegangan dengan cepat tanpa menimbulkan banyak kerugian ekonomi bagi pengguna. Beban yang disediakan oleh generator harus diatur sesuai dengan parameter berikut [16]:

a. Sensitif terhadap kegiatan perekonomian

Salah satu pertimbangan dalam memilih suatu beban untuk dilepaskan adalah apakah beban tersebut sensitif terhadap kegiatan perekonomian.

b. Tingkat kesulitan pengasutan

Parameter yang perlu dipertimbangkan saat memilih beban yang akan dilepaskan adalah tingkat kesulitan pengasutan. Suatu beban yang dipilih untuk dilepas adalah beban yang dapat dengan mudah dihubungkan kembali ke sistem apabila sistem telah bekerja secara normal.

c. Daya yang dibutuhkan

Parameter ketiga yang juga dipertimbangkan adalah daya yang diserap beban. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang dilepaskan, terlebih dahulu diperhitungkan besar beban yang harus dilepaskan.

2.10. Fuzzy Logic

Fuzzy logic adalah cabang dari sistem kecerdasan buatan atau *Artificial Intelligent* yang mengemulasi kemampuan manusia dalam berfikir ke dalam bentuk algoritma yang kemudian dijalankan oleh mesin. Algoritma ini digunakan dalam berbagai aplikasi pemrosesan data yang tidak dapat direpresentasikan dalam bentuk biner. *Fuzzy logic* menginterpretasikan statemen yang samar menjadi sebuah pengertian yang logis. *Fuzzy logic* memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 hingga 1 dan *fuzzy logic* menunjukkan sejauh mana suatu nilai benar dan sejauh mana suatu nilai itu salah. *Fuzzy logic* adalah suatu cara yang tepat untuk

memetakan suatu ruang *input* ke dalam suatu ruang *output* dan mempunyai nilai kontinyu [22].

Fuzzy secara bahasa diartikan sebagai kabur atau samar yang artinya suatu nilai dapat bernilai benar atau salah secara bersamaan. *Fuzzy logic* merupakan suatu logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran antara benar atau salah. Teori logika *fuzzy* suatu nilai dapat bernilai benar atau salah secara bersamaan. Namun seberapa besar kebenaran dan kesalahan tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya [23].

2.10.1. Himpunan *Fuzzy*

Derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy* setiap elemen dimasukkan dalam interval $[0,1]$. Klasifikasi himpunan *fuzzy* dengan dua variabel adalah sebagai berikut:

1. Variabel linguistik adalah sekelompok nama yang mewakili situasi tertentu dalam bahasa alami. Misal variabel kontras diklasifikasikan menjadi himpunan *fuzzy* B1, B2, B3, dan seterusnya yaitu banyaknya himpunan.
2. Variabel numerik adalah nilai yang menunjukkan besar kecilnya variabel. Misalnya pada variabel kontras diperoleh data numerik seperti 0,167, 0,145, dan 0,122.

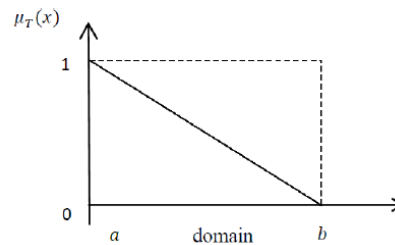
2.10.2. Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan atau biasa dikenal dengan *membership function* adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik data *input* kedalam derajat keanggotaan pada interval $[0,1]$. Pendekatan fungsi adalah salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Terdapat beberapa fungsi keanggotaan yaitu:

1. Representasi linier
Representasi paling sederhana dalam fungsi keanggotaan yaitu representasi linier yang digambarkan sebagai suatu garis lurus. Representasi linier dibagi menjadi:

a. Representasi linier turun

Representasi grafik penurunan himpunan bergerak kekanan dari nilai domain derajat keanggotaan satu menuju ke derajat keanggotaan yang lebih rendah menuju nol. Adapun representasi linier turun dapat dilihat pada Gambar 2.1.

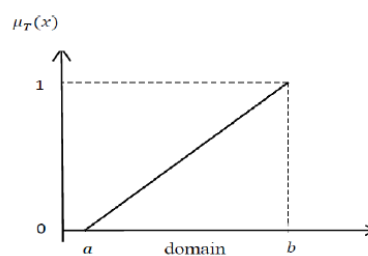


Gambar 2.1 Grafik Representasi Linier Turun [24]

Gambar 2.1 menunjukkan fungsi representasi linier turun dengan garis menurun yang terbentang dari *domain* a ke b dengan derajat keanggotaan dimulai dari 1 ke 0.

b. Representasi linier naik

Representasi grafik kenaikan himpunan bergerak ke kanan dari nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol menuju ke derajat keanggotaan yang lebih tinggi menuju satu. Adapun representasi linier naik dapat dilihat pada Gambar 2.2.

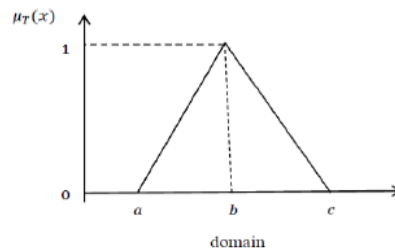


Gambar 2.2 Grafik Representasi Linier Naik [24]

Gambar 2.2 menunjukkan fungsi representasi linier naik dengan garis menaik yang terbentang dari *domain* a ke b dengan derajat keanggotaan dimulai dari 0 ke 1.

2. Representasi segitiga

Representasi segitiga adalah gabungan dari dua representasi garis, yaitu representasi garis menurun dan representasi garis menaik. Adapun representasi segitiga dapat dilihat pada Gambar 2.3.

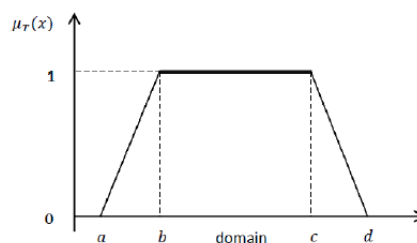


Gambar 2.3 Grafik Representasi Kurva Segitiga [24]

Gambar 2.3 menunjukkan representasi segitiga dengan rentang *domain* dari a ke c dan mempunyai derajat keanggotaan 1 pada *domain* b .

3. Representasi trapesium

Grafik representasi kurva trapesium pada dasarnya sama seperti representasi grafik kurva segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai derajat keanggotaan 1. Adapun representasi trapesium dapat dilihat pada Gambar 2.4.

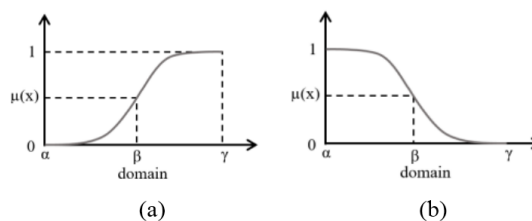


Gambar 2.4 Grafik Representasi Kurva Trapesium [24]

Gambar 2.4 menunjukkan grafik representasi kurva trapesium dengan rentang domain dari a ke d dan mempunyai derajat keanggotaan yang bernilai 1 terdapat di beberapa titik domain seperti b dan c .

4. Fungsi S (*sigmoid/logistic*)

Fungsi S terbagi menjadi menjadi dua bagian, yaitu kurva S naik dan kurva S turun. Fungsi kurva S naik merupakan representasi kurva kenaikan himpunan bergerak dari kiri ke kanan, memiliki derajat keanggotaan 0 menuju ke 1. Sedangkan fungsi kurva S turun merupakan representasi kurva penurunan himpunan bergerak dari kiri ke kanan, memiliki derajat keanggotaan 1 menuju 0. Adapun representasi kurva S naik dan S turun dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Fungsi Kurva S [25] (a) Fungsi Kurva S Naik (b) Fungsi Kurva S Turun

Gambar 2.5 (a) menunjukkan fungsi kurva S naik dengan garis menanjak yang terbentang dari domain α ke γ dengan derajat keanggotaan dimulai dari 0 ke 1. Adapun Gambar 2.5 (b) menunjukkan fungsi kurva S turun dengan garis menurun yang terbentang dari domain α ke γ dengan fungsi keanggotaan dimulai dari 0 ke 1. Representasi kurva S mempunyai fungsi keanggotaan yang didefinisikan dengan menggunakan 3 parameter, yaitu: α (bernilai 0), γ (bernilai 1), dan β (titik belok, memiliki domain 50%).

2.10.3. Rule Fuzzy

Aturan *fuzzy* adalah inti dari model *fuzzy*. Aturan *fuzzy* termasuk aturan *if-then* yang digunakan semua komponen untuk menghasilkan aturan yang efisien. Aturan *if-then* didefinisikan dalam Persamaan (2.1) [25].

$$Ru^{(1)}: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^1 \text{ o } \dots \text{ o } x_n \text{ is } A_n^1 \text{ then } y \text{ is } B^1 \quad (2.1)$$

Dimana $Ru^{(1)}$ menyatakan aturan ke- l dengan $l = 1, 2, 3, \dots, M$, x_n mewakili *input* ke- n , A_1^1 mewakili himpunan *input fuzzy* pada *input* ke- j , aturan ke- l , B^1 himpunan *fuzzy* pada *output* pada aturan ke- l , y menentukan keluaran dalam himpunan di V , dan o menentukan operasi pada himpunan *fuzzy*.

Pernyataan yang mengikuti *if* disebut sebagai anteseden, sedangkan pernyataan yang mengikuti *then* disebut konsekuensi. Aturan *fuzzy* terdiri dari sekumpulan aturan dan hubungan antar aturan dalam himpunan *fuzzy* dapat dijelaskan dalam definisi sebagai berikut [24].

Suatu himpunan *fuzzy if-then* lengkap jika untuk setiap $X \in U_i$ terdapat satu aturan pada *rules fuzzy*. $\mu_{A_1^i}(x_i) \neq 0$, untuk semua $i = 1, 2, \dots, n$. Suatu himpunan aturan-aturan *fuzzy if-then* dikatakan konsisten jika tidak ada aturan yang memiliki anteseden yang sama tetapi konsekuensinya berbeda [25].

2.10.4. Inferensi Fuzzy

Inferensi *fuzzy* adalah suatu tahap evaluasi pada *rules fuzzy*. Inferensi *fuzzy* tahap evaluasi dilakukan berdasarkan penalaran dengan menggunakan *input* dan *rules fuzzy* untuk mendapatkan *output fuzzy*. Inferensi *fuzzy* memiliki 3 metode yaitu sebagai berikut [25].

1. Metode Mamdani adalah suatu metode yang menggunakan fungsi implikasi MIN dan komposisi aturan MAX, dikarenakan hal tersebut metode Mamdani sering disebut sebagai metode MIN-MAX. Hasil *output* metode Mamdani masih berupa himpunan *fuzzy* sehingga perlu dikonversi menjadi himpunan tegas dengan proses *defuzzifikasi*. Himpunan tegas adalah himpunan yang terdefinisi dengan jelas untuk setiap elemen dalam semestanya [25].
2. Metode Sugeno hampir mirip dengan metode Mamdani. Perbedaannya terletak pada *output*, jika *output* metode Mamdani masih berupa himpunan *fuzzy* maka metode Sugeno berupa konstanta atau persamaan linier. Metode Sugeno terbagi menjadi dua yaitu metode Sugeno orde-nol dan orde-satu. *Defuzzifikasi* metode Sugeno adalah dengan cara mencari nilai rata-ratanya [25].
3. Metode Tsukamoto adalah metode dimana setiap konsekuensi dari *rules fuzzy* direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan yang monoton [25].

2.10.5. Fuzzyfikasi

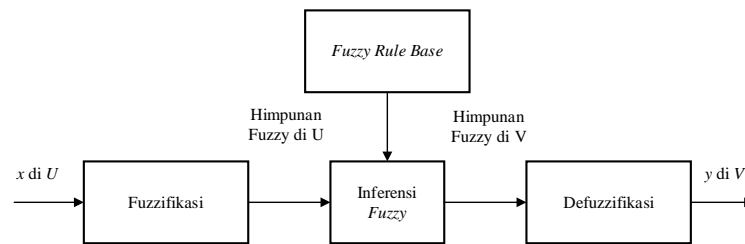
Fuzzyfikasi adalah pemetaan dari nilai *real* $x^* \in U$ ke dalam himpunan *fuzzy* A' pada U . Dikatakan bahwa *fuzzyfikasi* merupakan proses pengubahan nilai tegas menjadi nilai *fuzzy* dengan menggunakan fungsi keanggotaan. *Fuzzyfikasi* dibagi menjadi 3 metode yaitu, *fuzzyfikasi singleton* merupakan suatu pemetaan dari nilai *real* $x^* \in U$ ke dalam himpunan *fuzzy singleton* A' pada U yang berderajat 1 jika pada x^* dan 0 untuk nilai lainnya, *fuzzyfikasi gaussian* adalah proses penerapan nilai *real* $x^* \in U$ ke dalam himpunan *fuzzy* A' pada U yang berderajat keanggotaan *gaussian*, dan *fuzzyfikasi triangular* adalah proses pemetaan nilai *real* $x^* \in U$ ke dalam himpunan *fuzzy* A' pada U yang berderajat keanggotaan *triangular* [25].

2.10.6. Defuzzyfikasi

Defuzzyfikasi adalah transformasi yang merepresentasikan perubahan bentuk dari suatu himpunan *fuzzy* akibat inferensi *fuzzy* ke nilai tegasnya berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan sebelumnya, nilai *defuzzyfikasi* adalah keluaran dari proses logika *fuzzy*. *Defuzzyfikasi* dibagi menjadi 3 metode yaitu, metode *centroid* merupakan metode yang mengambil titik pusat y^* sebagai solusi nilai tegas, metode *center average defuzzifier* digunakan jika *output* fungsi keanggotaan dari beberapa proses *fuzzy* mempunyai bentuk yang sama dan metode ini mengambil nilai rata-rata dengan menggunakan pembobotan berupa derajat keanggotaan, dan metode *maximum defuzzifier* mengambil salah satu dari nilai-nilai variabel dimana himpunan bagian *fuzzy* memiliki nilai kebenaran maksimum sebagai nilai tegas bagi variabel *output* [25].

2.10.7. Model Fuzzy

Model *fuzzy* adalah suatu proses pengubahan *input* berupa nilai-nilai tegas dengan proses *fuzzyfikasi* menjadi nilai *fuzzy*, kemudian diproses kembali dengan proses inferensi *fuzzy* dengan aturan-aturan latar belakang *fuzzy* berupa aturan *fuzzy*, yang kemudian ditegaskan kembali dengan *defuzzyfikasi* menjadi nilai-nilai yang tegas [25]. Berikut tampilan model *fuzzy* pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Proses Permodelan *Fuzzy* [24]

Berdasarkan Gambar 2.6 model *fuzzy* mempunyai 4 komponen yaitu *fuzzyfikasi*, *rules fuzzy*, *inferensi fuzzy* dan *defuzzyfikasi*. Dimana pada proses *fuzzyfikasi* memasukan variabel *input* ke fungsi keanggotaan yang sesuai. Aturan *fuzzy* dapat dibentuk dari data numerik atau dari aturan yang dihasilkan seorang pakar. *Inferensi fuzzy* menentukan pemetaan dari ruang *input* himpunan *fuzzy* ke ruang *output* himpunan *fuzzy*. *Defuzzyfikasi* memetakan himpunan *fuzzy* ke himpunan tegas [26].

2.11. Pengujian Metode *Fuzzy*

Proses pengujian model *fuzzy* menggunakan parameter presisi dan tingkat kesalahan. Akurasi adalah ukuran seberapa akurat model dalam mengenali *input* yang diberikan untuk menghasilkan *output* yang benar. Secara umum dinotasikan dengan Persamaan (2.2) [27].

$$\text{tingkat keakuratan} = \frac{\text{nilai benar} - \text{hasil analisis}}{\text{nilai benar}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Tingkat akurasi dapat diperoleh dari nilai benar dikurangi dengan nilai dari hasil analisis menggunakan *fuzzy* kemudian dikalikan dengan 100%. Nilai benar diperoleh dari hasil perhitungan manual. Selain mengetahui nilai dari keakuratan data, perlu diketahui presentasi eror dari sebuah data dapat dihitung sesuai persamaan (2.3) di bawah ini.

$$\text{error} = 100\% - \text{tingkat keakuratan} \quad (2.3)$$

Berdasarkan Persamaan (2.3) *error* ini adalah perbandingan *error* model dalam mengenali *input* yang diberikan terhadap jumlah total data.

2.12. Perkiraan Tahapan Frekuensi Acuan

Tingkat frekuensi referensi pengoperasian underfrequency rele dapat diperkirakan berdasarkan seberapa banyak kelebihan beban yang terjadi. Setelah generator memasuki titik frekuensi abnormal karena kelebihan beban, pelepasan beban harus dilakukan sesegera mungkin. Pelepasan beban yang baik adalah tentang melepaskan jumlah beban yang tepat, baik dalam hal waktu pemulihan maupun jumlah beban yang dilepaskan. Supaya menghindari kelebihan beban, pelepasan beban harus dilakukan secara bertahap sesuai kebutuhan frekuensi [20].

Under frequency relay bekerja pada saat frekuensi generator mejuju kedalam wilayah abnormal. Agar memperoleh keandalan yang besar dari sistem tersebut maka harus dipilih tingkat frekuensi paling tinggi untuk rele *trip*. Nilai frekuensi tidak boleh sangat jauh dari batasan dasar nominal frekuensi.

Pemilihan tingkat frekuensi saat awal kali *under frequency relay* bekerja mutlak ditetapkan oleh pengguna. Pasti saja pemilihan frekuensi tertinggi ini melawati peninjauan-peninjauan spesifik semacam keamanan sistem yang diberikan, kapasitas generator dan keahlian sistem buat bertahan pada frekuensi tersebut. Nilai ini dirasa tidak terlalu rendah maupun terlalu tinggi untuk dijadikan patokan awal. Beberapa level frekuensi pada relai frekuensi perlu diatur lebih rendah dari frekuensi referensi awal untuk pengurangan beban yang lebih besar. Hal ini dilakukan untuk menghindari kekurangan beban yang dilepas pada tahap awal [20].

Menentukan frekuensi referensi untuk tahap kedua dan seterusnya. Tergantung pada besaran laju penurunan frekuensi yang terjadi dan waktu operasi rele pada fase sebelumnya.

1. Tingkat frekuensi secara bertahap menurun berdasarkan kelebihan beban yang terjadi

Langkah awal untuk memastikan frekuensi referensi yakni dengan menghitung besar laju penurunan frekuensi. Laju penurunan frekuensi tergantung berdasarkan pada besarnya daya kelebihan beban permintaan yang berlangsung, frekuensi nominal sistem, *rating* MVA generator dalam

keadaan sempurna serta konstanta inersia generator, dinotasikan pada Persamaan (2.4) [20].

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{P_A}{2GH} \right) x f_0 \quad (2.4)$$

Dimana $\frac{df}{dt}$ merupakan laju penurunan frekuensi (Hz), P_A merupakan selisih daya permintaan beban dengan daya yang disuplai generator (Watt), G merupakan *rating* MVA generator (MVA), H merupakan konstanta inersia (MJ/MVA), dan F_0 merupakan frekuensi nominal (Hz).

2. Waktu kerja rele

Lamanya waktu *trip* dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu [28]:

a. Waktu *pick-up*

Waktu *pick-up* ialah waktu yang diperlukan rele guna mulai beroperasi sehabis terjadi penurunan frekuensi [20]. Misalnya, pada frekuensi nominal 50 Hz, frekuensi rele *trip* yang awal merupakan 49,5 Hz. Sehingga waktu *pick-up* merupakan waktu yang dihitung sesaat sebelum frekuensi turun ialah ketika 50 Hz hingga frekuensi menuju tahap *trip* yang awal.

b. Waktu rele

Waktu rele adalah waktu yang diperlukan rele untuk mengirim sinyal ke *circuit breaker* dan dihitung dari deteksi sinyal frekuensi *trip* hingga sinyal mencapai *circuit breaker* [20].

c. Waktu *circuit breaker*

Waktu *circuit breaker* ialah waktu yang diperlukan *circuit breaker* buat mendapatkan sinyal dari rele hingga *circuit breaker* terbuka dan beban yang terintegrasi ke jaringan bagi *circuit breaker* terlepas [20].

Waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir saat pelepasan beban dilakukan setelah mendeteksi frekuensi tertinggi untuk *trip*, perhitungan tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2.5) di bawah ini [20].

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{CB} + t_{relay} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) merupakan perhitungan untuk mengetahui nilai dari waktu *trip* yang dimana terdapat beberapa waktu seperti $t_{pick-up}$ yaitu waktu yang

dibutuhkan rele untuk mulai bekerja setelah terjadi penurunan frekuensi, t_{CB} yaitu waktu yang dibutuhkan *circuit breaker* memutus tenaga, dan t_{relay} yaitu waktu yang diperlukan rele untuk mengirim sinyal ke *circuit breaker*. Adapun untuk mencari $t_{pick-up}$ dapat menggunakan Persamaan (2.6) di bawah ini.

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \quad (2.6)$$

Dimana F_1 ialah frekuensi referensi pelepasan beban awal. Setelah laju penurunan frekuensi dan waktu *trip* fase sebelumnya diperoleh, untuk nilai frekuensi saat terjadi pelepasan beban didapatkan dengan Persamaan (2.7).

$$f_{load shedding} = [f_0 - \frac{df}{dt}(t_{trip})] \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) nilai frekuensi ketika terjadinya pelepasan beban, $f_{load shedding}$ didapatkan dari selisih antara frekuensi mula dengan hasil perkalian laju penurunan frekuensi $\frac{df}{dt}$ dan t_{trip} yaitu waktu yang dibutuhkan rele untuk *trip*. Frekuensi *trip* fase berikutnya kemudian harus sedikit lebih rendah daripada frekuensi ketika beban dilepaskan dari frekuensi *trip* fase sebelumnya.

2.13. Perhitungan Beban dan Frekuensi Setelah Gangguan

Memperoleh nilai beban yang harus dilepaskan maka harus ditentukan beberapa standar dengan meninjau keandalan sistem, yaitu [20]:

1. Frekuensi yang dibutuhkan sesudah pelepasan beban.
2. Waktu pemulihan.

Pelepasan beban sebaiknya diterapkan sehingga frekuensi generator pulih dengan cepat. Oleh karena itu, untuk mendapatkan jumlah pelepasan beban yang diperlukan, seseorang harus menentukan nilai yang diharapkan dari frekuensi dan waktu pemulihan setelah pelepasan beban. Kedua parameter ini digunakan untuk menghitung laju kenaikan frekuensi yang akan terjadi [20]. Adapun Persamaan (2.8) untuk mendapatkan nilai laju kenaikan frekuensi setelah melakukan pelepasan beban.

$$f_n = f_{ls} + \frac{df}{dt}t \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) dimana F_n merupakan frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban, F_{ls} merupakan frekuensi generator ketika terjadi pelepasan beban $\frac{df}{dt}$ merupakan laju kenaikan frekuensi yang diharapkan dan t merupakan waktu pemulihan. Adapun setelah mengetahui besarnya laju kenaikan yang diinginkan maka dengan Persamaan (2.9) didapatkan nilai beban optimal yang harus dilepas:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load\ Shedding})}{2GH} \times f_n \quad (2.9)$$

Berdasarkan Persamaan (2.9) dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai frekuensi dan semakin cepat waktu pemulihan yang dibutuhkan sesudah pelepasan, semakin tinggi pula nilai beban yang dilepas. Pelepasan beban dapat direalisasikan dalam beberapa fase, sehingga pada fase awal beban tidak dilepaskan secara penuh.

2.14. Kajian Pustaka

Penelitian mengenai kestabilan sistem tenaga telah dikembangkan sebelumnya menggunakan beberapa metode yang berbeda. Penelitian yang telah dilakukan dijadikan sebagai referensi untuk mendukung penelitian analisis kestabilan tegangan menggunakan metode *fuzzy logic* pada sistem distribusi 20 kV.

Penelitian pertama membahas analisis mekanisme pelepasan beban terhadap pengaruh kestabilan frekuensi dan tegangan akibat putusnya generator pada Gardu Induk (GI) Tambak Lorok. Penelitian ini menggunakan *software* ETAP untuk simulasi gangguan pada skenario pelepasan beban. Hasil penelitian menunjukkan ketika sistem mengalami gangguan padamnya generator GTG (Gas Turbine Generator) 1.3 membutuhkan pelepasan beban tahap I 10% sebesar 64,7 MW, tahap II 15% sebesar 75 MW dan tahap III 25% sebesar 125 MW dapat mengembalikan sistem menjadi stabil [1].

Penelitian kedua membahas mengenai metode pelepasan beban untuk mengatasi *drop* tegangan dan *overload* pada saluran transmisi atau distribusi berdasarkan nilai sensitivitas bus. Penelitian ini menggunakan bantuan *software* DigSilent Power Factory untuk simulasi gangguan sistem dengan dua skenario yaitu ketika terjadi jatuh tegangan dan *overload* pada saluran transmisi dan saluran

distribusi. Menggunakan metode sensitivitas bus, didapatkan area kritis stabilitas tegangan yang akan dijadikan referensi lokasi pelepasan beban. Hasil penelitian menunjukkan pada skenario pertama yaitu perbaikan tegangan sistem pada bus 6 dari 0,89 p.u menjadi 0,9 p.u setelah pelepasan beban pada bus 9 sebesar 15 MVA. Selanjutnya skenario kedua mengalami perbaikan sistem dari peningkatan pembebanan pada line B sebesar 102,86% menjadi 78,5% setelah dilakukan pelepasan beban pada bus 12 sebesar 24 MVA [29].

Penelitian ketiga membahas mengenai peran *fuzzy logic* untuk mengoptimasi pelepasan beban pada sebuah perangkat *Smart Meter*. Alat ini berfungsi untuk memonitoring penggunaan energi listrik serta dapat melakukan pelepasan beban secara otomatis untuk menghindari adanya gangguan. Sistem otomatisasi *load shedding* menggunakan *fuzzy logic* Mamdani sehingga dapat mengenali pola, klasifikasi, prediksi dan optimasi terhadap penggunaan listrik. Hasil dari penelitian 5 kali pengujian dan 6 kali percobaan dengan kombinasi beban yang berbeda, didapatkan nilai *error* tegangan sebesar 0,429%, arus sebesar 3,4% dan pengujian konversi arus menjadi daya sebesar 2,37% dengan *delay* rata-rata sebesar 2,302 detik untuk memutuskan *relay* pada beban [30].

Penelitian keempat membahas mengenai *undervoltage load shedding*. Sistem tenaga listrik *undervoltage load shedding* sangatlah penting untuk mencegah *voltage collapse* dan mengantisipasi terhadap kondisi diluar perencanaan, atau kondisi ekstrem yaitu mencegah terjadinya penyebaran sistem yang *collapse* menjadi lebih luas. Hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pelepasan beban dengan PSO algoritma dapat mencari nilai minimum jumlah pelepasan beban, dimana pelepasan beban menggunakan PSO algoritma mengalami penurunan sebesar 22% dari pada data PLN, dan penurunan nilai rugi daya sebesar 3,56%, dan kenaikan tegangan minimum sistem sebesar 0,3% [31].

Penelitian kelima membahas analisis pelepasan beban menggunakan *Under Frequency Relay* (UFR) pada pembangkitan Tanjung Jati B Jepara. Penelitian ini menggunakan bantuan *software* ETAP untuk simulasi gangguan beban lebih untuk menganalisis respon tegangan dan frekuensi. Skenario yang diterapkan pada

penelitian ini adalah skenario penambahan beban 30%, beban 50%, beban 70% dan beban 100%. Hasil simulasi didapatkan pada skenario beban 30%, 50% dan 70% tidak dilakukan pelepasan beban karena perubahan frekuensi tidak mencapai dalam batas setting UFR 98%. Sedangkan skenario penambahan beban 100% dilakukan pelepasan beban 90 MVA dan frekuensi kembali menjadi normal pada detik ke-48 [32].

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang menjadi tujuan kajian pustaka, maka permasalahan pada setiap penelitian dapat diambil metode dan cara mengatasinya pada masing-masing penelitian. Secara garis besar, penelitian yang diambil berkaitan tentang pelepasan beban menggunakan *fuzzy logic*. Penelitian yang dilakukan menggunakan metode *fuzzy logic* untuk menganalisis kestabilan tegangan terhadap pelepasan beban pada sistem distribusi 20 kV.