

## BAB II

# TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kestabilan Transien

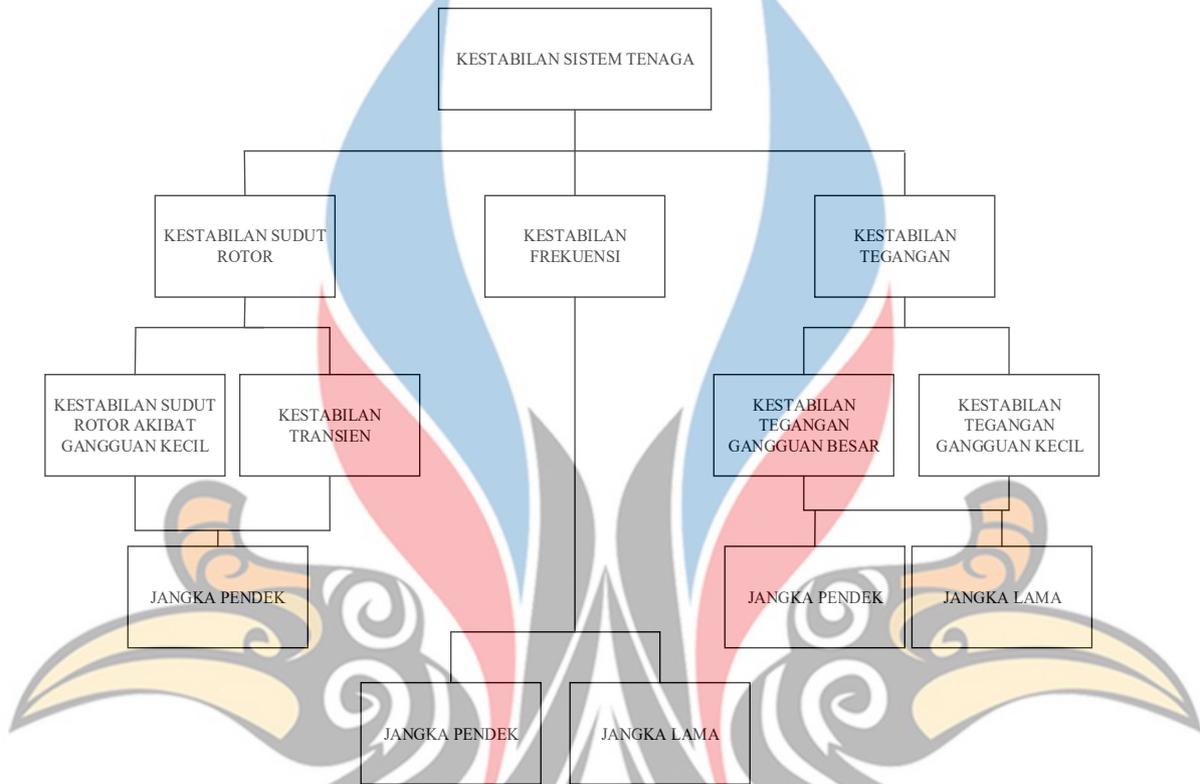
Kestabilan transien adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak (Grigsby, 2012). Studi kestabilan transien diperlukan untuk memastikan kemampuan sistem untuk bisa menahan kondisi transien setelah gangguan besar. Seringkali, studi tersebut dilakukan ketika terjadi pemasangan fasilitas transmisi maupun pembangkitan yang baru. Hal ini sangat membantu dalam hal menentukan sistem rele yang diperlukan, waktu kritis pemutusan *circuit breaker*, tingkat tegangan dan kemampuan transfer antara satu sistem dengan yang lain (Van Cutsem, 1998).

Dalam keadaan operasi sistem tenaga listrik yang normal terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik atau beban pada sistem. Dalam keadaan seimbang, daya mekanik dan daya elektrik bergerak secara bersamaan dengan kecepatan konstan. Ketika terjadi gangguan, maka terjadi perbedaan daya elektrik dan mekanik dari generator. Kelebihan daya elektrik membuat perlambatan putaran rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebannya generator. Namun kelebihan daya mekanik membuat percepatan pada putaran rotor, hal ini disebabkan semakin ringan beban yang ditanggung generator. Bila gangguan tidak segera dihilangkan, maka perlambatan atau percepatan putaran rotor generator mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam suatu sistem (Marsudi, 2006).

Perubahan kondisi sistem yang seketika, biasanya terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik, dan pelepasan atau penambahan beban yang benar secara tiba-tiba. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, maka keadaan sistem akan berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode peralihan atau transien. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis sistem tenaga

listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak, jika terjadi gangguan (Rotinsulu, 2015). [www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

Kestabilan transien merupakan cabang dari kestabilan sudut rotor. Adapun klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik itu sendiri dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem (Kundur, 1994)

## 2.2 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Hal ini berkaitan dengan kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing masing mesin. Ketidakstabilan tersebut dapat mengakibatkan berubahnya kecepatan sudut ayunan generator sehingga generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator yang lain. Hal tersebut disebabkan daya *output* dari generator berubah sesuai dengan berubahnya sudut rotor. (Kundur, 1994).

Untuk memudahkan dalam analisis dan menambah wawasan maka kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua sub kategori (Grigsby, 2012) yaitu:

1. *Small-disturbance* (gangguan kecil)

Kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi terhadap gangguan kecil. *Small-disturbance* ini tergantung pada keadaan awal operasi sistem. Ketidakstabilan mungkin timbul karena 2 hal yaitu peningkatan sudut rotor pada mode non-osilasi dan tidak periodik karena kurangnya torsi sinkronisasi. serta osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

2. *Large-disturbance* (gangguan besar)

Gangguan ini biasa disebut sebagai *transient stability* yakni kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang parah. Seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan dari besarnya sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh adanya hubungan sudut daya.

Kestabilan transien bergantung pada kondisi awal sistem operasi dan tingkat keparahan dari gangguan yang terjadi. Ketidakstabilan biasanya menghasilkan sudut baru karena torsi sinkronisasi tidak cukup. Sehingga mewujudkan ketidakstabilan ayunan pertama. Tetapi dalam sistem tenaga listrik yang besar, tidak selalu terjadi ketidakstabilan ayunan pertama, melainkan bisa menjadi hasil superposisi dari mode ayunan *interarea* yang lambat, sehingga ketidakstabilan melebihi ayunan pertama. Perubahan torsi elektromekanik pada mesin sinkron yang mengalami gangguan dapat dibagi menjadi dua komponen (Grigsby, 2012):

1. Komponen torsi sinkron, pada fasa dengan penyimpangan sudut rotor.
2. Komponen torsi peredam (*damping torque*), pada fasa dengan penyimpangan kecepatan.

Kestabilan sistem tergantung pada kedua komponen torsi tersebut untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkron akan menghasilkan ketidakstabilan tanpa osilasi, sebaliknya kekurangan torsi peredam akan menghasilkan ketidakstabilan yang disertai dengan osilasi (Kundur, 1994).

### 2.3 Kejadian Transien

Kestabilan transien dipengaruhi beberapa kejadian, antara lain:

1. Hubung Singkat
2. *Motor starting*
3. Perubahan beban

### 2.3.1 Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Hubung singkat merupakan hubungan yang bersifat abnormal yang terjadi baik secara tidak sengaja maupun sengaja pada dua titik potensial yang berbeda (IEEE C37-100, 1992). Gangguan hubung singkat terjadi akibat adanya isolasi yang tembus atau rusak karena tidak tahan terhadap tegangan lebih, baik yang berasal dari dalam maupun yang berasal dari luar yakni sambaran petir. Bila gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung dengan lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh- pengaruh yang tidak diinginkan yang dapat terjadi (Stevenson, 1982) antara lain:

1. Berkurangnya batas-batas kestabilan untuk sistem daya.
2. Rusaknya perlengkapan yang berada dekat dengan gangguan yang disebabkan oleh arus tak seimbang, atau tegangan rendah yang ditimbulkan oleh hubung singkat.
3. Ledakan-ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sewaktu terjadinya suatu hubung singkat, dan yang mungkin menimbulkan kebakaran sehingga dapat membahayakan orang yang menanganinya dan merusak peralatan – peralatan yang lain.
4. Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu oleh suatu rentetan tindakan pengamanan yang diambil oleh sistem – sistem pengamanan yang berbeda – beda, kejadian ini dikenal sebagai “*cascading*”.

### 2.3.2 *Motor Starting*

Sebuah rangkaian motor dimana saat motor di *start* secara langsung pada tegangan penuh akan timbul *drop* tegangan atau *voltage sag* secara tiba - tiba pada sistem. Jatuh tegangan yang diakibatkan oleh arus *starting* dari motor induksi, yang besar jatuh tegangannya tergantung pada ukuran motor, faktor daya waktu *starting*, impedansi sistem dan metode *starting* (Basri, 1997).

Pada waktu *starting*, umumnya faktor daya 0,3 dan besarnya arus *starting* motor berkisar antara 4 sampai 7 kali arus beban nominalnya dan biasanya 5 kali dari nominalnya bila tidak ada ketentuan lainnya. *Drop* tegangan akibat *starting* motor - motor besar di industri dan *drop* tegangan akibat gangguan hubung singkat di sistem tenaga umumnya hanya terjadi selama beberapa milidetik dan kemudian tegangan normal kembali. Gejala terakhir ini dikenal sebagai kedip tegangan (*voltage dip* atau *voltage sag*) (Weedy, 1998).

### 2.3.3 Perubahan Beban

Perubahan beban meliputi terjadinya penambahan beban besar yang masuk secara tiba-tiba dan pelepasan beban dengan nominal yang besar. Dua hal tersebut dapat mengakibatkan kestabilan sistem akan terganggu dan dapat mengakibatkan frekuensi di sistem menjadi turun atau naik. Hal ini dikarenakan daya keluar elektrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula, dan kekurangan ini diakibatkan dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya  $\delta$  bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar. Contoh gangguan yang dapat menyebabkan terjadinya gangguan peralihan antara lain (IEEE C37.106,1987):

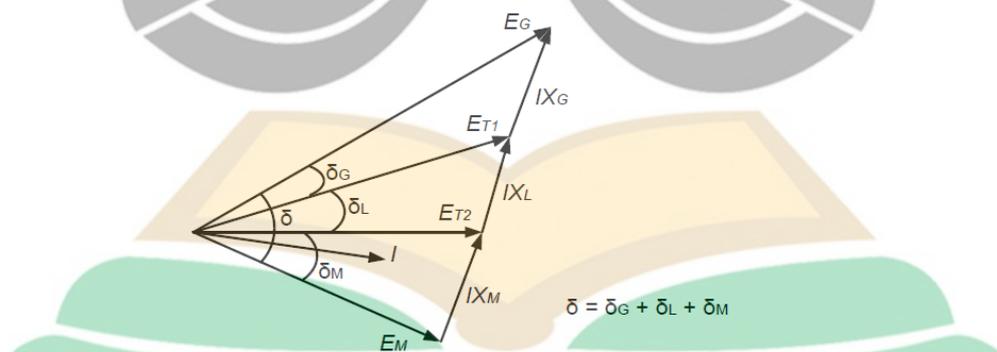
1. Jumlah beban melebihi batas kestabilan keadaan aman untuk kondisi tegangan dan reaktansi rangkaian tertentu.
2. Jika beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis yang tidak dapat kembali.

Maka untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beban (*load shedding*) yang merupakan salah satu cara untuk mempertahankan kestabilan jika terjadi gangguan pada sistem.. Apabila gangguan tidak segera diatasi, maka akan menimbulkan turunnya frekuensi sistem diluar standar yang diizinkan.

Pokok permasalahan dari pelepasan beban pada suatu sistem adalah menentukan jumlah pelepasan beban, macam-macam beban yang dilepas pertahap, frekuensi, dan keterlambatan waktu yang akan direncanakan pada setiap pelepasan. Pelepasan beban harus bisa menahan frekuensi sistem agar tetap pada standar yang diizinkan.

## 2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Pada Kundur, 1994 dimana membahas persamaan sudut daya, apabila diilustrasikan dua buah mesin sinkron dimana keduanya saling terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki reaktansi dan daya generator yang digunakan untuk mesuplai motor merupakan fungsi pembeda sudut  $\delta$  antara rotor kedua mesin. Perbedaan sudut  $\delta$  tersebut timbul akibat adanya ketiga komponen yaitu sudut internal generator, perbedaan sudut antara tegangan pada generator dan motor, serta sudut internal motor. Sudut internal generator  $\delta_G$  adalah sudut dimana rotor generator yang mendahului medan putar pada stator.  $\delta_L$  adalah sudut dimana tegangan generator mendahului tegangan motor. Sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar pada stator motor dinamakan sudut internal motor  $\delta_M$ . Berikut diagram fasor yang menunjukkan bentuk hubungan antara tegangan internal motor  $E_M$  dan dengan tegangan internal generator  $E_G$  dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Phasor Sistem Dua Mesin (Kundur, 1994)

Dari Gambar 2.2 di atas dapat diperoleh suatu persamaan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut. Untuk mempermudah mencari persamaan sudut daya, maka dibuat sebuah skema sederhana yang biasa

digunakan untuk studi kestabilan. Dimana tegangan peralihan generator dimisalkan sebagai  $E'_{T_1}$  dan tegangan motor dimisalkan sebagai  $E'_{T_2}$ . Sedangkan reaktansi generator, jaringan transmisi serta reaktansi motor dijadikan satu dan dimasukkan ke dalam sebuah kotak, sehingga tampak seperti Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram Skema Kestabilan (Marsudi, 2006)

Dari Gambar 2.3 di atas maka diperoleh:

$$Y_{rel} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Adapun persamaan umum aliran daya adalah:

$$P_k - jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N (Y_{kn} V_n)^* \quad (2.2)$$

Kemudian nilai  $k$  dan  $N$  dibuat berturut-turut yakni 1 dan 2, dan variabel  $V$  diganti variabel  $E'$  maka didapatkan:

$$P_1 - Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (2.3)$$

Apabila didefinisikan masing-masing variabel maka didapatkan:

$$E'_1 = |E'_1| \angle \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| \angle \delta_2 \quad (2.4)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \theta_{12} \quad (2.5)$$

Maka didapatkan:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta_1 - \delta_{11} - \theta_{12}) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta_1 - \delta_{11} - \theta_{12}) \quad (2.7)$$

Persamaan (2.6) dan (2.7) juga berlaku di bus 2 dengan mengganti variabel 1 untuk 2 dan 2 untuk 1 dalam dua persamaan sebelumnya. Kemudian dimisalkan:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

Kemudian ditetapkan sudut baru  $\gamma$ , maka didapatkan:

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

Dimana apabila dimasukkan pada persamaan (2.6) maka akan didapatkan:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.10)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2|B_{11}| - |E'_1||E'_2||Y_{12}|\cos(\delta - \gamma) \quad (2.11)$$

Apabila disederhanakan maka didapatkan:

$$P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma) \quad (2.12)$$

Dimana

$$P_c = |E'_1|^2|G_{11}| \quad P_{max} = +|E'_1||E'_2||Y_{12} \quad (2.13)$$

Pada persamaan (2.11) di atas variabel  $P_e$  mewakili keluaran daya listrik dari generator dimana rugi jangkar diabaikan. Persamaan ini disebut dengan persamaan sudut-daya. Parameter  $P_c$ ,  $P_{max}$ , dan  $\gamma$  adalah konstanta untuk konfigurasi jaringan tertentu, besaran tegangan  $|E'_1|$  dan  $|E'_2|$  juga merupakan sebuah konstanta. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jaringan dianggap tanpa resistansi dan semua unsur dari  $Y_{bus}$  adalah susceptansi maka  $G_{11}$  dan  $\gamma$  keduanya bernilai nol. Sehingga dari persamaan (2.12) sudut-daya yang berlaku untuk sistem transmisi reaktansi murni yaitu:

$$P_e = P_{max} \sin(\delta) \quad (2.14)$$

$$P_e = \frac{|E'_1||E'_2|}{X} \sin(\delta) \quad (2.15)$$

Adapun Grainger, 1994 membahas persamaan ayunan dimana persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa torsi percepatan merupakan hasil kali dari momen kelambaman / inersia rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ayunan dapat ditulis

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.16)$$

Dimana,

$J$  : Momen inersia total dari massa rotor dalam Kg-m<sup>2</sup>

$\theta_m$  : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)

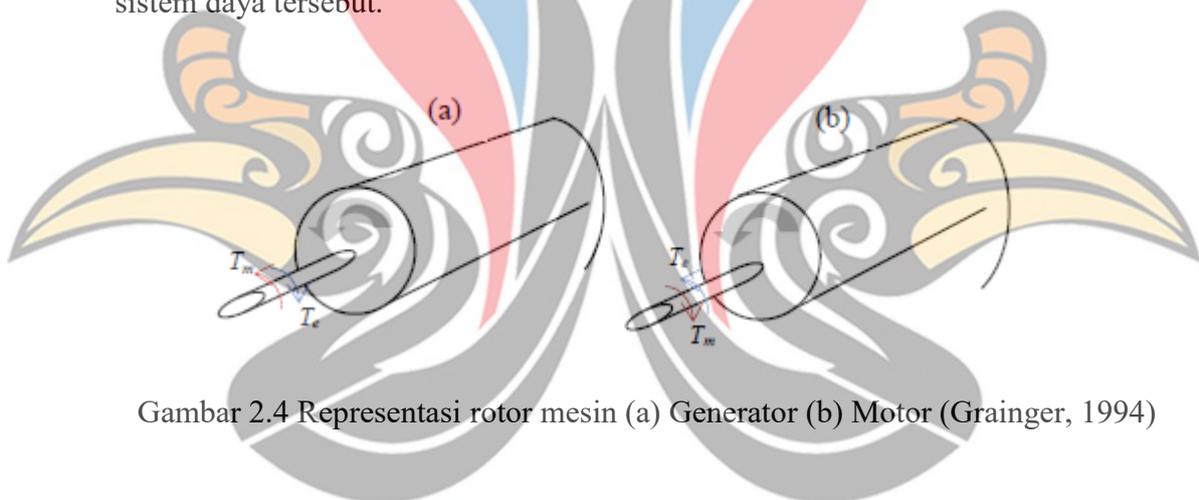
$T_e$  : Momen putar elektrik atau elektromagnetik, (Nm)

$T_a$  : Momen putar kecepatan percepatan bersih (net), (Nm)

$t$  : Waktu dalam detik (s)

$T_m$  : Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh *prime mover* dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (Nm)

Apabila torsi mekanis  $T_m$  bernilai positif pada generator sinkron, maka hal ini menandakan bahwa  $T_m$  adalah resultan torsi yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran  $\theta_m$  yang positif. Sedangkan apabila  $T_m$  bernilai negatif, menandakan bahwa  $T_m$  memiliki kecenderungan sebaliknya yakni untuk memperlambat rotor dalam arah putaran  $\theta_m$  yang positif. Terdapat Gambar 2.4 sebagai representasi rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta medan putar mekanis dan elektris. Sementara itu, Apabila  $T_m$  sama dengan  $T_a$  dan  $T_e$  sama dengan nol untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap (*steady state*). Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan hasil kecepatan *steady state* pada kecepatan sinkron. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan *prime over* berada pada keadaan sinkron dalam sistem daya tersebut.



Gambar 2.4 Representasi rotor mesin (a) Generator (b) Motor (Grainger, 1994)

$T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sedangkan momen putar  $T_a$  sama dengan nol pada generator yang bekerja dalam keadaan tetap. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan hasil kecepatan *steady state* seperti kecepatan sinkron. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan sinkron dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan sinkron dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk menggambarkan pengaruh pada  $T_m$ .

Apabila generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron  $\omega_{sm}$  maka didefinisikan:

$$T_m = T_e \quad (2.17)$$

Apabila terjadi gangguan akan menghasilkan suatu perlambatan ( $T_m < T_e$ ) atau percepatan ( $T_m > T_e$ ) dimana:

$$T_m = T_m - T_e \quad (2.18)$$

Pada persamaan (2.16) karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan (2.19).

$$\theta_m = \omega_{sm} t - \delta_m \quad (2.19)$$

Dimana

$\omega_{sm}$  : Kecepatan sinkron mesin (radian/detik)

$\delta_m$  : Sudut pergeseran rotor, dalam *mechanical radians*, dari sumbu referensi putaran sinkron (derajat)

Dengan  $\theta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.19) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan (2.20)

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} - \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.20)$$

Dimana persamaan percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.21)$$

Persamaan (2.20) menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor  $\frac{d\theta_m}{dt}$  adalah konstan dan kecepatan sinkron hanya saat  $\frac{d\delta_m}{dt}$  adalah nol. Oleh karena itu,  $\frac{d\delta_m}{dt}$  menunjukkan deviasi kecepatan rotor saat sinkron dengan satuan pengukuran mekanikal radian per detik. Persamaan (2.21) merepresentasikan percepatan rotor diukur pada mekanikal radian per detik kuadrat. Dengan memasukkan persamaan (2.21) pada (2.19), maka didapatkan:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad Nm \quad (2.22)$$

Untuk mempermudah persamaan kecepatan sudut rotor didefinisikan:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.23)$$

Menurut prinsip dasar dinamika rotor yang menyatakan bahwa daya ( $P$ ) adalah perkalian antara torsi dengan kecepatan sudut, maka apabila persamaan (2.22) dikalikan dengan  $\omega_m$  akan didapatkan:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.24)$$

Dimana,

$P_m$  : Daya mekanis

$P_e$  : Daya elektrik

$P_a$  : Daya percepatan yang menyumbang ketidakseimbangan keduanya

Koefisien  $J\omega_m$  adalah momentum sudut rotor pada kecepatan sinkron  $\omega_{sm}$  dan dinotasikan dengan  $M$  (konstanta inersia mesin). Satuan  $M$  adalah *joule-seconds per mechanical radian*, sehingga persamaan juga dapat dituliskan dalam bentuk seperti persamaan (2.25).

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (2.25)$$

Dalam data mesin untuk studi kestabilan transien terdapat suatu konstanta yang sering dijumpai yaitu inersia mesin ( $H$ ) yang didefinisikan:

$$H = \frac{\text{Daya kinetis mega joule pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_{mach}} \quad \text{MJ/MVA} \quad (2.26)$$

Dimana  $S_{mach}$  adalah *rating* 3 fase dari mesin dalam MVA. Dengan menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai  $M$  pada persamaan (2.25), didapatkan:

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mechrad} \quad (2.27)$$

Dengan memasukkan  $M$  di persamaan (2.25), dan  $\delta_m$  memiliki satuan yang sama dengan  $\omega_{sm}$  maka didapatkan:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (2.28)$$

Dimana  $\omega_s = 2\pi f$ , maka persamaan (2.28) menjadi persamaan (2.29).

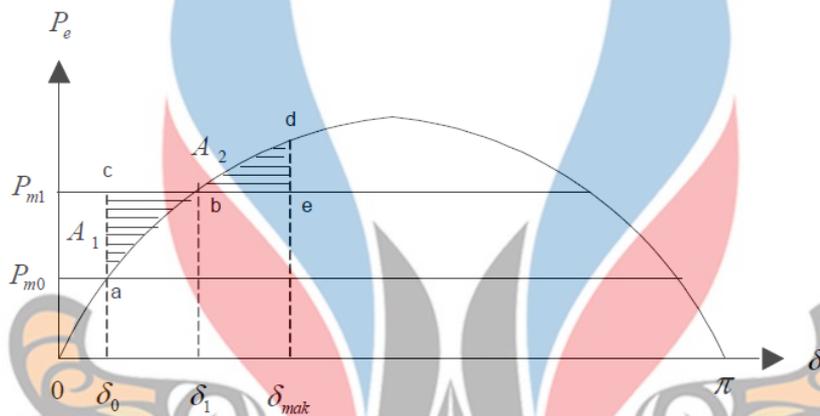
$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.29)$$

Saat  $\delta$  dalam *electrical radians*, maka didapatkan:

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.30)$$

Oleh karena itu persamaan (2.30) menjelaskan *Swing Equation* mesin berupa persamaan dasar yang mengatur dinamika rotasi dari mesin sinkron pada studi kestabilan.

## 2.5 Persamaan Kriteria Sama Luas



Gambar 2.5 Kriteria sama luas saat perubahan beban mendadak (Rotinsulu, 2015)

Studi kestabilan transien meliputi penentuan tercapai atau tidaknya sinkronisasi setelah mesin mengalami gangguan. Gangguan tersebut dapat berupa pembebanan tiba-tiba, kehilangan pembangkit, kehilangan beban yang besar, ataupun gangguan pada sistem. Suatu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi kestabilan yang cepat adalah metode kriteria sama luas. Metode ini hanya dapat dipakai untuk suatu sistem satu mesin yang terhubung ke *infinite bus* atau sistem dua mesin. Secara keseluruhan, metode kriteria sama luas dapat dilihat pada Gambar 2.5. Mesin bekerja pada titik setimbang  $\delta_0$ . Pada titik ini daya input mekanik  $P_{m0} = P_{e0}$  seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Penambahan daya input tiba-tiba yang dinyatakan oleh garis horizontal  $P_{m1}$ . Dengan  $P_{m1} = P_{e0}$ , daya percepatan pada rotor adalah positif dan sudut daya  $\delta$  bertambah. Kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama percepatan awal dapat dihitung dengan persamaan (2.31).

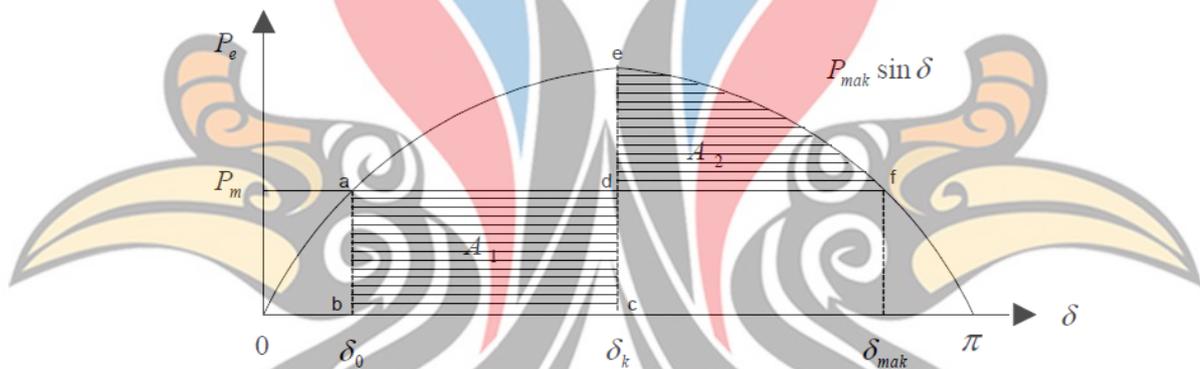
$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas } abc = \text{luas } A_1 \quad (2.31)$$

Dengan penambahan  $\delta$ , daya listrik bertambah, dan pada saat  $\delta = \delta_1$  maka daya input yang baru adalah  $P_{m_1}$ . Walaupun daya percepatan adalah nol pada titik ini, rotor berputar di atas kecepatan sinkron. Oleh karena itu sudut daya  $\delta$  dan daya listrik  $P_e$  bertambah secara kontinyu. Sekarang  $P_m < P_e$  yang menyebabkan motor diperlambat ke arah kecepatan sinkron hingga  $\delta = \delta_{max}$ , maka kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama perlambatan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.32).

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{m_1} - P_e) d\delta = \text{luas } bdc = \text{luas } A_2 \quad (2.31)$$

Dari persamaan (2.31) dan persamaan (2.32) diperoleh persamaan (2.33) yang dikenal sebagai kriteria sama luas (Rotinsulu, 2015).

$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \quad (2.31)$$



Gambar 2.6 Kriteria sama luas untuk mencari sudut pemutus kritis (Rotinsulu, 2015)

Dalam pengaplikasiannya ketika terjadi gangguan tiga fasa, dapat ditentukan sudut pemutus kritis ( $\delta_c/\delta_k$ ) agar mesin dapat kembali stabil. Untuk mencarinya, dibutuhkan persamaan ayunan pada (2.29) dimana  $P_e$  bernilai 0 ketika gangguan. Maka persamaan menjadi sebagai berikut.

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m$$

atau

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{H}{\pi f} P_m \quad (2.33)$$

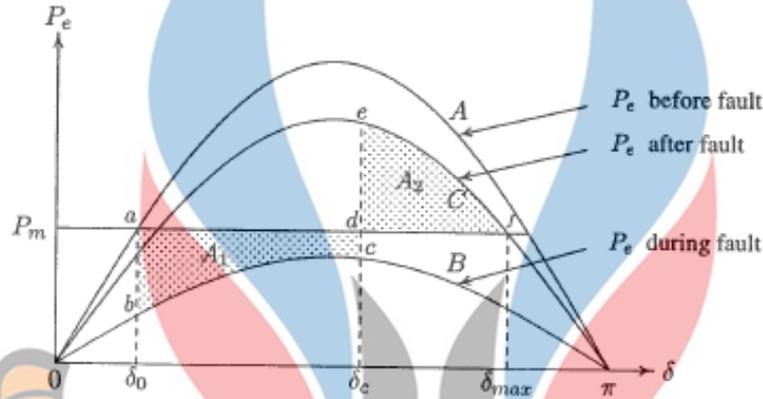
dengan melakukan integral pada setiap ruas sebanyak 2 kali, maka didapatkan:

$$\delta = \frac{\pi f}{2H} P_m t^2 + \delta_0 \quad (2.34)$$

bila  $\delta$  menjadi  $\delta_c$  maka *critical clearing time* (CCT) adalah

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f P_m}} \quad (2.35)$$

dan  $\delta_c$  didapatkan dari persamaan kriteria sama luas dari 3 kondisi yakni sebelum gangguan, ketika gangguan, dan setelah gangguan. Sehingga kurva menjadi seperti yang ditunjukkan Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kriteria sama luas pada 3 kondisi (Saadat, 1999)

Sehingga persamaan kriteria sama luas didapatkan:

$$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{2max} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} P_{3max} \sin \delta d\delta - P_m(\delta_{max} - \delta_c) \quad (2.36)$$

dengan penyelesaian tersebut maka didapatkan  $\delta_c$  seperti persamaan (2.37).

$$\cos \delta_c = \frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) + P_{3max} \cos \delta_{max} - P_{2max} \cos \delta_0}{P_{3max} - P_{2max}} \quad (2.37)$$

dengan  $\delta_{max}$  didefinisikan:

$$\delta_{max} = 180^\circ - \delta_0 \quad (2.38)$$

## 2.6 Waktu Pemutus Kritis (*Critical Clearing Time*)

*Critical Clearing Time* (CCT) adalah titik kritis dalam satuan *seconds* yang menjadi penentu suatu sistem tenaga listrik masih dalam keadaan stabil atau tidak. Apabila suatu sistem mengalami gangguan, maka area yang mengalami gangguan akan diisolasi dengan cara memutus CB (*circuit breaker*). CB bekerja dengan koordinasi dari rele pengaman yang membutuhkan waktu paling cepat 0.1 *seconds* untuk beroperasi. Namun bila hanya melakukan pemutusan saluran seperti itu tidak

menjamin sistem akan kembali ke keadaan stabil. Pemutusan yang dilakukan oleh CB harus kurang dari waktu pemutus kritis atau CCT-nya untuk memastikan sistem kembali ke kondisi stabil. Dan sebaliknya, apabila sistem diputus lebih dari waktu pemutus kritisnya maka sistem akan berada pada keadaan tidak stabil yang lama kelamaan akan mengakibatkan kegagalan kerja generator lalu *blackout*. *Critical clearing time* (CCT) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.35). (Eviningsih, 2015).

## 2.7 Aliran Daya Metode *Newton Raphson*

Aliran daya metode *Newton Raphson* adalah teknik yang efektif untuk memperbaiki persamaan aljabar *non-linear*, dimana dapat bekerja lebih cepat dan konvergen dibandingkan dengan metode *Gauss-Seidel*. Metode ini termasuk metode praktis dalam penyelesaian aliran daya dari jaringan sistem tenaga yang besar. Hanya saja kekurangannya adalah kebutuhan besar memori komputer, yang dapat diatasi melalui skema penyimpanan yang baik (Kusekwa, 2014). Konvergensi dapat dipercepat secara signifikan dengan melakukan iterasi primer melalui metode *Gauss-Seidel*, dan penggunaan nilai-nilai yang diperoleh untuk menyelesaikan iterasi *Newton Raphson* (Kaur, 2014).

Dasar dari metode *Newton Raphson* dalam penyelesaian aliran daya adalah deret *Taylor* untuk suatu fungsi dengan dua variabel lebih. Metode *Newton Rhapsion* menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu set persamaan *non-linear* untuk menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap *bus*. Metode *Newton Raphson* lebih sesuai untuk menghitung aliran beban pada sistem dengan jumlah yang besar, daripada metode *Gauss-Seidel* karena memiliki jumlah iterasi yang lebih sedikit dan konvergensi yang cepat (Abaali, 2018).

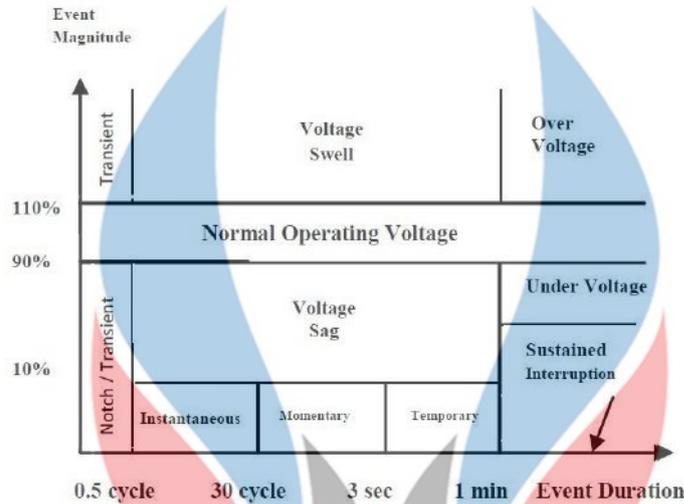
## 2.8 Standar yang Digunakan

### 2.8.1 Standar Tegangan

Standar yang digunakan untuk tegangan nominal dalam kondisi normal berdasarkan standar PLN, yaitu:

1. 500 kV +5%, -5%
2. 150 kV +5%, -10%

3. 70 kV +5%, -10%
4. kV +5%, -10%



Gambar 2.8 *Voltage Reduction Standard* standar IEEE Std. 1159-1995 (IEEE, 1995)

Sedangkan standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std 1159-1995). Gambar 2.8 menunjukkan bahwa batas kedip tegangan yang diperbolehkan adalah 10% untuk *momentary* selama 3 detik dan untuk *temporary* selama 1 menit.

### 2.8.2 Standar Pelepasan Beban

Ketika beban dalam kondisi kekurangan suplai daya, tidak diizinkan melepas beban secara besar-besaran. Terdapat skema pelepasan beban yang mengacu pada standar WECC *Under Voltage Load Shedding*, yaitu pelepasan beban tiga langkah. Tabel 2.1 merupakan skema pelepasan beban tiga langkah berdasarkan standar WECC *Under Voltage Load Shedding*.

Tabel 2.1 Standar pelepasan beban 3 langkah

Step	Voltage (%)	Persentase Pelepasan Beban (%)	Time Delay (s)
1	90%	5	3,5
2	92%	10	5
3	92%	15	8

Adapun standar *under frequency load shedding* mengacu pada ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana memiliki pelepasan beban tiga langkah dan pelepasan beban enam langkah. Tabel 2.2 merupakan skema pelepasan beban tiga langkah dan enam langkah berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Tabel 2.2 Standar pelepasan beban 3 langkah

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Persentase Pelepasan Beban (%)	Fixed Time Delay (Cycle) Relay
1	49.42	10	6
2	49.08	15	6
3	48.75	seperti yang dibutuhkan pelepasan sebelum 48,5	-

Tabel 2.3 Standar pelepasan beban 6 langkah

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Persentase Pelepasan Beban (%)	Fixed Time Delay (Cycle) Relay
1	49,58	10	6
2	49,33	10	6
3	49	5	6
4	49	5	14
5	48,67	5	14
6	48,67	5	21

## 2.9 Data Minimal Parameter Kestabilan Transien

Berikut merupakan data minimal yang harus ada apabila melakukan simulasi kestabilan transien.

### A. Data Pembangkit (Generator)

Tabel 2.4 Data Minimal Parameter Pemodelan Generator

Parameter	Simbol	Satuan	Parameter	Simbol	Satuan
Generator ID	-	-	Effisiensi	%Eff	%
Mode Operasi	<i>I</i>	Ampere	Jumlah Pole	<i>P</i>	-
Daya Rating	<i>P</i>	MW	Bus connections	-	-
Tegangan Rating	<i>V</i>	kV	Service	-	-
PF Rating	%PF	%	Tipe Rotor	-	-
Daya Rating	S	MVA	Tipe Dinamis	-	-

## B. Data Beban

Tabel 2.5 Data Minimal Parameter Pemodelan Beban

Parameter	Simbol	Satuan	Parameter	Simbol	Satuan
<i>Load ID</i>	-	-	<i>Daya Rating</i>	S	MVA
<i>Demand Factors</i>	-	-	<i>Bus connections</i>	-	-
<i>Daya Rating</i>	<i>P</i>	MW	<i>Service</i>	-	-
<i>Tegangan Rating</i>	<i>V</i>	Kv	<i>Kuantitas</i>	-	-
<i>PF Rating</i>	%PF	%	<i>Data Kabel</i>	-	-

## C. Data Transformator

Tabel 2.6 Data Minimal Parameter Pemodelan Transformator

Parameter	Simbol	Satuan	Parameter	Simbol	Satuan
<i>Transformer ID</i>	-	-	<i>Z Variasi &amp; Toleransi</i>	$\Omega$	Ohm
<i>Daya Rating</i>	<i>P</i>	MW	<i>Bus connections</i>	-	-
<i>Tegangan Rating</i>	<i>V</i>	Kv	<i>Service</i>	-	-
<i>X/R Ratio</i>	-	Ohm	<i>Tap Trafo</i>	%	Persen
<i>Daya Rating</i>	S	MVA	<i>Konfigurasi</i>	-	-

## D. Data Saluran (Kabel)

Tabel 2.7 Data Minimal Parameter Pemodelan Kabel

Parameter	Simbol	Satuan	Parameter	Simbol	Satuan
<i>Kabel ID</i>	-	-	<i>Resistansi</i>	$\Omega$	Ohm
<i>Panjang</i>	M	Meter	<i>Reaktansi</i>	$\Omega$	Ohm
<i>Konduktor per fasa</i>	-	-	<i>Susceptansi</i>	$\Omega$	Ohm
<i>Tipe Kabel</i>	-	-	<i>Impedansi</i>	$\Omega$	Ohm
<i>Tegangan Rating</i>	kV	Kilovolt	<i>Temperatur</i>	$^{\circ}\text{C}$	Celsius

## 2.10 Penelitian Terdahulu

Pada Tabel 2.4 menjelaskan penelitian terdahulu serta posisi penelitian dari tugas akhir yang akan dikerjakan.

Tabel 2.8 Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian

Penelitian	Judul	Keterangan
<b>Oleg Lenga 2014</b>	<i>Application of Critical Clearing Time as a Transient Stability Criterion for Power System Expansion Planning</i>	Metode : Kriteria sama luas Hasil : Konfigurasi sistem yang dihasilkan tidak mempengaruhi nilai CCT secara signifikan. Terlihat bahwa nilai CCT ditentukan terutama oleh besarnya stabilitas <i>swing</i> pertama.
<b>Md. Shazzadul Islam, dkk 2016</b>	<i>Effect of variation of different generator parameters on the stability of a small power plant: An Analysis Through ETAP Software</i>	Metode : <i>Swing Equation</i> Hasil : Dalam analisis mode <i>grid</i> , dapat memulihkan stabilitas dengan mengubah <i>clearing time</i> tetapi dalam operasi mode <i>islanding</i> , waktu penyelesaian gangguan tidak cukup dalam mempertimbangkan inersia tinggi untuk memulihkan kondisi stabil.
<b>Md. Rabiul Islam, dkk 2017</b>	<i>Voltage and Transient Stability Analysis in Bangladesh's Power System Network (BPSN)</i>	Metode : <i>Swing Equation</i> (transien); <i>Newton Raphson</i> , <i>Fast Decoupled</i> , dsb. (aliran daya) Hasil : Memberikan kapasitor <i>shunt</i> di antara <i>bus</i> ke titik bawah menghasilkan peningkatan stabilitas tegangan dalam batas konsekuensi positif sebagai tingkat tegangan yang dapat diterima dalam sistem.
<b>Jian Zhuo, dkk 2017</b>	<i>Study of Transient Voltage Stability with Transient Stability Probing Method in Hunan Power Grid</i>	Metode : <i>Probing</i> Hasil : Dengan metode ini, dapat mengukur hasil simulasi dan mengidentifikasi kelemahan stabilitas tegangan transien dalam sistem, yang dapat membantu untuk melakukan pengukuran yang meningkatkan stabilitas tegangan transien sistem.
<b>Bargaan, dkk 2017</b>	<i>Frequency control and Under Frequency Load Shedding in the isolated area of Sharorah, Saudi Arabia</i>	Metode : <i>Under Frequency Load Shedding</i> Hasil : Respons frekuensi individu dari unit ditentukan, perubahan kebijakan harus dilakukan untuk <i>dispatching</i> unit dan cadangan direkomendasikan dan pengaturan UFLS ditinjau untuk memastikan stabilitas area apabila terjadi ketidakseimbangan.
<b>Reddy, dkk 2017</b>	<i>Transient Stability Analysis Of A Combined Cycle Power Plant Using Etap Software</i>	Metode : <i>Swing Equation</i> Hasil : Nilai maksimum yang diizinkan dari waktu <i>clearing</i> dimana sistem tetap stabil yaitu, CCT dihitung untuk kesalahan yang diberikan.

Tabel 2.8 Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian (Lanjutan)

Penelitian	Judul	Keterangan
<b>Phootrakornchai, dkk 2018</b>	<i>Real-time Critical Clearing Time Estimation By Considering Contingency Conditions</i>	Metode : <i>ANFIS</i> Hasil : Menyelesaikan CCT dengan mempertimbangkan kondisi darurat, seperti pelepasan transmisi dan perubahan konfigurasi jaringan. Semua efek signifikan dari dinamika dipertimbangkan sebagai model detail. Sistem IEEE 9-bus digunakan untuk implementasi dalam penelitian ini. Ini membuktikan bahwa hasil CCT dapat digunakan untuk estimasi waktu-nyata.
<b>Wildan Liulinnuha Ihsan, 2020</b>	Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan PT Petrokimia Gresik Akibat Penambahan Pabrik-1B	Metode : <i>Swing Equation</i> , kriteria sama luas

