

BAB II

www.itk.ac.id

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Transmisi

Sistem tenaga listrik terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem subtransmisi, dan sistem distribusi (Gonen, 1988). Daya listrik dari pusat pembangkit disalurkan ke berbagai tempat melalui saluran transmisi. Standar tegangan sistem transmisi dibuat oleh *American National Standards Institute* (ANSI). Saluran tegangan transmisi yang beroperasi di lebih dari 60 kV distandarisasi pada 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, dan 765 kV *line-to-line*. Tegangan transmisi di atas 230 kV biasanya disebut *Extra High Voltage* (EHV). Amerika menggunakan tegangan mulai 115 kV sampai 765 kV (Saadat, 1999). Tegangan saluran transmisi di sistem PLN adalah 150 kV, yang disebut Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan 275 kV – 500 kV yang disebut Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) (Sudirham, 2012).

Sesungguhnya ada dua jenis saluran transmisi yaitu saluran bawah tanah (*underground*) dan diatas tanah (*overhead*) yang kita sebut sebagai saluran udara. Jenis saluran udara merupakan jenis yang umum digunakan. Panjang saluran udara dapat mencapai ratusan kilometer. Konduktor yang biasa digunakan pada saluran udara adalah konduktor telanjang (tanpa isolasi padat) sehingga ia harus didukung oleh isolator yang terpasang pada menara. Saluran ini berhubungan langsung dengan udara sehingga sangat terpengaruh oleh kondisi alam seperti polusi dan petir (Sudirham, 2012). Tujuan dari jaringan transmisi udara adalah untuk mentransfer energi listrik dari unit pembangkit di berbagai lokasi ke sistem distribusi yang pada akhirnya menyuplai beban. Saluran transmisi juga menghubungkan utilitas tetangga yang memungkinkan tidak hanya pengiriman daya secara ekonomis di dalam wilayah selama kondisi normal, tetapi juga transfer daya antar daerah selama keadaan darurat (Gonen, 1988).

Saluran transmisi harus mempunyai fleksibilitas untuk menyalurkan daya besar melalui sejumlah rute. Saluran transmisi dirancang sedemikian rupa sehingga jika terjadi kegagalan pada sejumlah kecil saluran tidak akan menyebabkan

kegagalan pada seluruh sistem. Saluran ini juga harus mampu berfungsi sebagai penghubung yang mampu menyalurkan energi dua arah. Piranti yang menghubungkan generator dan saluran transmisi adalah transformator, yang berfungsi untuk mengubah tegangan keluaran generator ke tegangan transmisi yang lebih tinggi (Sudirham, 2012).

2.2 Aliran Daya AC

Analisis aliran daya merupakan hal yang penting dilakukan dalam perencanaan dan perancangan untuk pengembangan sistem tenaga listrik masa depan juga dapat menentukan operasi terbaik yang dapat dilakukan sistem. Informasi dasar untuk menganalisis aliran daya adalah *magnitude* dan sudut fasa dari tegangan pada tiap bus serta daya aktif dan reaktif yang mengalir pada saluran (Grainger dan William, 1994).

Secara umum persamaan aliran daya pada dapat ditulis sebagai berikut (Xi-Fan dkk, 2008):

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.1)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.2)$$

dimana besarnya daya aktif (P_k) dan reaktif (Q_k) yang mengalir dari bus k menuju bus j dapat ditentukan dengan mengetahui magnitude tegangan (V), sudut tegangan fasa (θ), konduktansi (G), dan susceptansi (B) pada masing-masing bus.

Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2), persamaan untuk aliran daya AC didapatkan dengan menggunakan tiga pendekatan sederhana sebagai berikut (Sivanagaraju dan Reddy, 2007):

1. Pendekatan Pertama: Resistansi Sistem Transmisi Diasumsikan Bernilai Nol
Resistansi (r) dari saluran transmisi secara signifikan lebih kecil dibandingkan dengan reaktansinya (x). Sehingga saluran transmisi dengan impedansi (z) yang biasa dirumuskan seperti persamaan (2.3) sebagai berikut (Saadat, 1999),

$$z = r + jx \quad (2.3)$$

www.itk.ac.id

akan memiliki admitansi (Y) seperti persamaan (2.4) berikut (Bird, 2017):

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{z} = \frac{1}{r + jx} = \frac{1}{r + jx} \times \frac{r - jx}{r - jx} = \frac{r - jx}{r^2 + x^2} \\ &= \frac{r}{r^2 + x^2} - \frac{jx}{r^2 + x^2} = G + jB \end{aligned} \quad (2.4)$$

Berdasarkan persamaan (2.4), kita dapat melihat dimana nilai konduktansi (G) dan suseptansi (B) dapat dirumuskan seperti persamaan (2.5) dan (2.6) berikut (Bird, 2017):

$$G = \frac{r}{r^2 + x^2} \quad (2.5)$$

$$B = \frac{-x}{r^2 + x^2} \quad (2.6)$$

Jika resistansi (r) bernilai lebih kecil apabila dibandingkan dengan reaktansinya (x), maka dapat diamati bahwa konduktansi (G) akan mempunyai nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan suseptansi (B), dan ini menjadi dasar jika persamaan (2.5) dan (2.6) menjadi (Sivanagaraju dan Reddy, 2007):

$$G = 0 \quad (2.7)$$

$$B = \frac{-1}{x} \quad (2.8)$$

Sekarang jika nilai konduktansi (G) sama dengan nol, maka bagian *real* dari semua elemen *Y-bus* akan bernilai nol. Jika persamaan (2.7) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.1) dan (2.2), maka didapatkan (Sivanagaraju dan Reddy, 2007):

www.itk.ac.id

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.9)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.10)$$

2. Pendekatan Kedua: Nilai Sudut *Cosine* Mendekati Nol dan *Sine* Bernilai Sudut Radian

Untuk hampir seluruh tipe kondisi operasi, perbedaan sudut fasa tegangan pada dua bus k dan j yang terhubung melalui sebuah saluran dimana $\theta_k - \theta_j$ untuk bus k dan j tidak lebih dari 10 – 15 derajat. Sangat jarang terjadi nilai perbedaan sudut fasa tegangan melebihi 30 derajat. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa perbedaan sudut fasa tegangan antar bus pada saluran transmisi “kecil”. Sangat jelas jika sudut $\delta = \theta_k - \theta_j$ menjadi semakin kecil dan mendekati nol maka nilai fungsi *cosine* akan mendekati 1,0. Sedangkan untuk fungsi *sine* pada sudut yang “kecil”, pendekatan yang lebih baik adalah sudut itu sendiri dalam satuan radian. Karena untuk sudut yang sangat kecil, nilai *sine* dari sebuah sudut sama dengan sudut itu sendiri. Sehingga, berdasarkan pendekatan kedua, persamaan (2.9) dan (2.10) menjadi (Sivanagaraju dan Reddy, 2007):

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} (\theta_k - \theta_j)) \quad (2.11)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj}) \quad (2.12)$$

Mengingat bahwa jumlah elemen B_{kj} bukan hanya sebuah suseptansi melainkan elemen sebuah matriks *Y-bus*. Maka terdapat dua kondisi:

- Jika $k \neq j$ maka $B_{kj} = -B_{kj}$. Elemen *Y-bus* pada baris k kolom j adalah nilai negatif dari suseptansi pada saluran yang menghubungkan bus k ke bus j .
- Jika $k = j$, maka $B_{kk} = B_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N B_{kj}$

Tarik kedua kondisi tersebut pada persamaan (2.11) dan (2.12) sebagai berikut:

- Pada persamaan aliran daya reaktif (2.12) dapat ditulis ulang dengan menggunakan kondisi $k = j$.

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj}) = -|V_k|^2 B_{kk} - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj}) \quad (2.13)$$

Substitusi nilai B_{kk} untuk element Y -bus:

$$\begin{aligned} Q_k &= -|V_k|^2 \left(B_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N B_{kj} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj}) \\ &= -|V_k|^2 B_k - |V_k|^2 \sum_{j=1, j \neq k}^N B_{kj} - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (-B_{kj}) \\ &= -|V_k|^2 B_k - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k|^2 B_{kj} + \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (B_{kj}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Substitusikan kondisi $j \neq k$ ke dalam persamaan (2.14) sehingga menjadi,

$$\begin{aligned} Q_k &= -|V_k|^2 B_k - \left(\sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k|^2 B_{kj} - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (B_{kj}) \right) \\ &= -|V_k|^2 B_k - \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| B_{kj} (|V_k| - |V_j|) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Karena kita mendefinisikan admitansi (Y) dari saluran antara bus k dan bus j sebagai $Y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj}$, dan semua saluran mempunyai elemen seri yang bersifat induktif, maka nilai dari B_{kj} adalah negatif. Sehingga kita dapat menulis ulang persamaan (2.15) menjadi (Sivanagaraju dan Reddy, 2007),

$$Q_k = -|V_k|^2 B_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |B_{kj}| (|V_k| - |V_j|) \quad (2.16)$$

- Pada persamaan aliran daya aktif (2.11), ditarik kondisi $k = j$ sehingga,

$$\begin{aligned}
 P_k &= \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \\
 &= |V_k|^2 (B_{kk} (\theta_k - \theta_k)) + \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} (\theta_k - \theta_j))
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Sehingga berdasarkan persamaan (2.17), persamaan aliran daya aktif pada pendekatan kedua menjadi,

$$P_k = \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} (\theta_k - \theta_j)) \tag{2.18}$$

3. Pendekatan Ketiga: Nilai *Magnitude* Tegangan sama dengan 1,0 p.u

Pada pendekatan ketiga, nilai dari *magnitude* tegangan $|V_k|$ dan $|V_j|$ mendekati 1,0. Hampir seluruh tipe kondisi operasi memiliki jangkauan tegangan dengan nilai 0,95 sampai 1,05 dalam satuan per unit. Implikasikan hal ini ke dalam persamaan (2.16) dan (2.18) sehingga menjadi,

$$Q_k = -|V_k|^2 B_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (|V_k| - |V_j|) \tag{2.19}$$

$$P_k = \sum_{j=1, j \neq k}^N |V_k| |V_j| (B_{kj} (\theta_k - \theta_j)) \tag{2.20}$$

Diberikan nilai $0,95 < |V_k|$ dan $|V_j| < 1,05$, maka jika kita asumsikan $|V_k| = |V_j| = 1,0$ persamaan (2.19) dan (2.20) menjadi,

$$Q_k = -B_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N B_{kj} (|V_k| - |V_j|) \tag{2.21}$$

$$P_k = \sum_{j=1, j \neq k}^N (B_{kj} (\theta_k - \theta_j)) \quad (2.22)$$

Melalui persamaan (2.21) dan (2.22), didapatkan pernyataan sebagai berikut:

- Nilai daya reaktif yang mengalir di sepanjang saluran ditentukan oleh perbedaan besar tegangan fasa antar *bus* yang saling terhubung.
- Nilai daya aktif yang mengalir di sepanjang saluran ditentukan oleh perbedaan sudut fasa tegangan antar *bus* yang saling terhubung.

Sehingga, dapat diperhatikan bahwa terdapat perbedaan antara daya reaktif maximum dan daya aktif maximum yang mengalir disepanjang saluran.

- Persamaan aliran daya reaktif sesuai untuk sistem yang rentan mengalami perbedaan besar tegangan fasa. Perbedaan besar tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1,0 p.u.
- Persamaan aliran daya aktif sesuai untuk sistem yang rentan mengalami perbedaan sudut fasa tegangan. Perbedaan sudut fasa tegangan maksimum yang terjadi sebesar 0,52 radian.

Algoritma aliran daya AC memiliki tingkat presisi yang tinggi tetapi tidak memiliki tingkat kecepatan yang tinggi. Dalam industri analisis sistem tenaga, kebutuhan akan perhitungan dengan tingkat presisi yang tinggi tidak begitu mendesak, tetapi kebutuhan akan perhitungan yang cepat lebih diperlukan, khususnya dalam sistem tenaga berskala besar. Penyederhanaan algoritma aliran daya yang lebih sederhana dibandingkan algoritma aliran daya *fast decoupled* digunakan. Algoritma ini disebut dengan “*MW Only*”. Dalam metode ini, persamaan Q-V pada pemodelan *fast decoupled* tidak digunakan. Hanya persamaan P-Q yang digunakan untuk memeriksa sudut berdasarkan daya aktif yang *mismatch* (Zhu, 2009).

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{V_1} \\ \frac{\Delta P_2}{V_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_{n-1}}{V_{n-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{11} & -B_{12} & \cdots & -B_{1,n-1} \\ -B_{21} & -B_{22} & \cdots & -B_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -B_{n-1,1} & -B_{n-1,2} & \cdots & -B_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Dalam perhitungan aliran daya “*MW-Only*”, *magnitude* tegangan diasumsikan konstan atau bernilai 1,0 selama iterasi P-Q. Untuk mencapai hasil konvergen, hanya *mismatch* pada daya aktif yang diperiksa tidak peduli berapapun nilai *mismatch* pada daya reaktif. Algoritma penyederhanaan aliran daya yang lebih sederhana adalah aliran daya DC. Algoritma aliran daya DC juga merupakan algoritma “*MW Only*” tetapi memiliki beberapa kondisi sebagai berikut (Zhu, 2009):

1. Seluruh *magnitude* tegangan (V) bernilai 1,0.
2. Resistansi (r) *branch* diabaikan, susceptansi (B) *branch* adalah

$$[B_{ij}] = -\frac{1}{x_{ij}} \quad (2.24)$$

$$[B_{ii}] = \sum_{j \in i, j \neq i} \frac{1}{x_{ij}} \quad (2.25)$$

3. Perbedaan sudut pada akhir dari tiap *branch* sangat kecil, sehingga,

$$\sin \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (2.26)$$

$$\cos \theta_{ij} = 1 \quad (2.27)$$

4. Abaikan seluruh *ground* dari *branch*,

$$B_{i0} = B_{j0} = 0 \quad (2.28)$$

Oleh karena itu, maka pemodelan aliran daya DC menjadi,

www.itk.ac.id

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$[\Delta P] = [B'] [\Delta \theta] \quad (2.30)$$

dimana,

$$P_i = \sum_{j \in i} [B_{ij}] \theta_j \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2.31)$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} \quad (2.32)$$

atau dalam bentuk matriks,

$$[P] = [B] [\theta] \quad (2.33)$$

$$\theta = [X] P \quad (2.34)$$

$$[X] = [B^{-1}] \quad (2.35)$$

Persamaan aliran daya DC merupakan persamaan linear, sehingga hanya membutuhkan satu kali iterasi perhitungan untuk mencapai konvergen. Bagaimanapun, persamaan ini hanya baik digunakan untuk perhitungan aliran daya aktif pada saluran transmisi dan transformator. Sehingga daya yang mengalir pada tiap saluran dengan persamaan aliran daya DC adalah (Zhu, 2009),

$$P_{ij} = -B_{ij} \theta_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{(x_{ij})} \quad (2.36)$$

Beberapa kelebihan metode aliran daya DC dibandingkan dengan aliran daya AC adalah sebagai berikut (Grainger dan William, 1994), (Wood dkk, 2014):

1. Solusinya *non-iterative* dan pasti konvergen

2. Dapat digunakan untuk analisis keamanan
3. Perhitungan yang lebih sederhana sehingga proses pengerjaan lebih cepat
4. Perkiraan yang bagus untuk nilai sudut tegangan *bus*

2.3 Keandalan dan Keadaan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Keandalan suatu sistem didefinisikan sebagai suatu komponen atau sistem yang memenuhi fungsi dalam periode waktu yang diberikan selama digunakan dalam kondisi beroperasi. Dengan kata lain keandalan adalah peluang tidak terjadinya kegagalan selama sistem beroperasi. Keandalan suatu sistem tenaga listrik ditentukan oleh penilaian kecukupan (*adequacy assessment*) dan penilaian keandalan (*security assessment*). Penilaian *adequacy assessment* berkaitan dengan kemampuan sistem untuk memasok energi listrik ke pelanggan dengan memenuhi persyaratan dengan cara yang memuaskan. Penilaian *security assessment* berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap bertahan akibat adanya gangguan atau hilangnya elemen sistem yang tidak dapat diantisipasi. Hal ini termasuk respon sistem yang diakibatkan oleh lepasnya pembangkit dan saluran transmisi (Billinton dan Ronald, 1996).

Suatu sistem tenaga listrik yang mampu bertahan dan tidak mengalami pemadaman akibat lepasnya salah satu elemen sistem dikatakan sistem tersebut andal dengan kriteria N-1. Evaluasi keandalan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan berbagai metode salah satunya menggunakan metode analisis kontingensi. Hasil-hasil analisis kontingensi ini mengizinkan sistem untuk dioperasikan dalam keadaan tertentu. Apabila ada bagian sistem yang mengalami gangguan maka sistem yang tersisa harus memikul beban penyaluran yang lebih besar tetapi masih dalam batas operasi yang diizinkan. Dengan kriteria keandalan keamanan N-1 apabila dalam sistem terdapat N buah elemen yang terlepas, sistem tidak akan kehilangan beban atau tidak terjadi pemadaman (Marceau dkk, 2006).

Dalam pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik, apabila suatu saluran transmisi mengalami kerusakan sehingga menyebabkan saluran terputus, maka saluran transmisi yang tersisa akan memikul beban yang lebih besar namun masih

berada pada batasan operasi yang diizinkan. Jika beberapa gangguan terjadi pada suatu sistem yang melanggar batasan operasi, maka kejadian tersebut akan mengakibatkan pemutusan peralatan dari sistem. Apabila proses kegagalan bertingkat (*cascading outage*) berlanjut, maka sebagian besar atau keseluruhan sistem akan mengalami pemadaman total (*system blackout*) (Wood dkk, 2014).

Sistem tenaga dapat dibagi menjadi empat keadaan operasi (Wood dkk, 2014):

a. *Normal State Dispatch*

Merupakan keadaan sistem tenaga sebelum kontingensi. Hal ini optimal untuk operasi ekonomis, namun tidak aman.

b. *Post contingency*

Merupakan keadaan sistem tenaga setelah kontingensi terjadi. Pada kondisi ini, saluran atau trafo melewati batas yang diizinkan atau tegangan bus diluar batas.

c. *Secure dispatch*

Merupakan keadaan sistem tenaga tanpa kegagalan kontingensi namun perbaikan terhadap parameter operasi untuk tujuan keamanan.

d. *Secure post-contingency*

Merupakan keadaan sistem saat kontingensi diterapkan pada kondisi operasi dasar dengan perbaikan.

Menurut Dirjen Listrik dan Pemanfaatan Energi (2004:79) sistem dinyatakan berada dalam keadaan operasi yang berhasil atau memuaskan bila:

1. Frekuensi dalam batas kisaran operasi normal ($50 \pm 0,2$ Hz), kecuali penyimpangan dalam waktu singkat diperkenankan pada kisaran ($50 \pm 0,5$ Hz), sedangkan selama kondisi gangguan frekuensi boleh berada pada batas 47,5 Hz sampai 51,5 Hz.
2. Tegangan di Gardu Induk berada dalam batas yang ditetapkan dalam aturan penyambungan yaitu : Tegangan 500 kV adalah $\pm 5\%$ sedangkan Tegangan 150 kV, 70 kV, 20 kV adalah $+5\%$ dan -10% . Batas-batas ini harus menjamin bahwa tegangan pada semua pelanggan berada pada kisaran yang telah ditetapkan sepanjang pengatur tegangan jaringan

- distribusi dan peralatan pemasok daya reaktif bekerja dengan baik. Operasi pada batas-batas tegangan ini diharapkan dapat membantu mencegah terjadinya tegangan-jatuh (*voltage collapse*) dan masalah stabilitas sistem.
3. Tingkat pembebanan saluran transmisi dipertahankan pada batas-batas yang telah ditetapkan dan tingkat pembebanan arus di semua peralatan jaringan transmisi dan gardu induk berada dalam batas *rating* normal untuk semua *single contingency* gangguan peralatan.
 4. Konfigurasi sistem sedemikian rupa sehingga semua CB (*circuit breaker*) jaringan transmisi mampu memutus arus gangguan yang mungkin terjadi dan mengisolir peralatan yang terganggu.

2.4 Analisis Kontingensi

Kontingensi adalah kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih saluran dan atau generator pada sistem tenaga listrik. Kontingensi N-1 adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya satu komponen sistem. Kontingensi N-a adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya a komponen sistem (Marceau dkk, 2006).

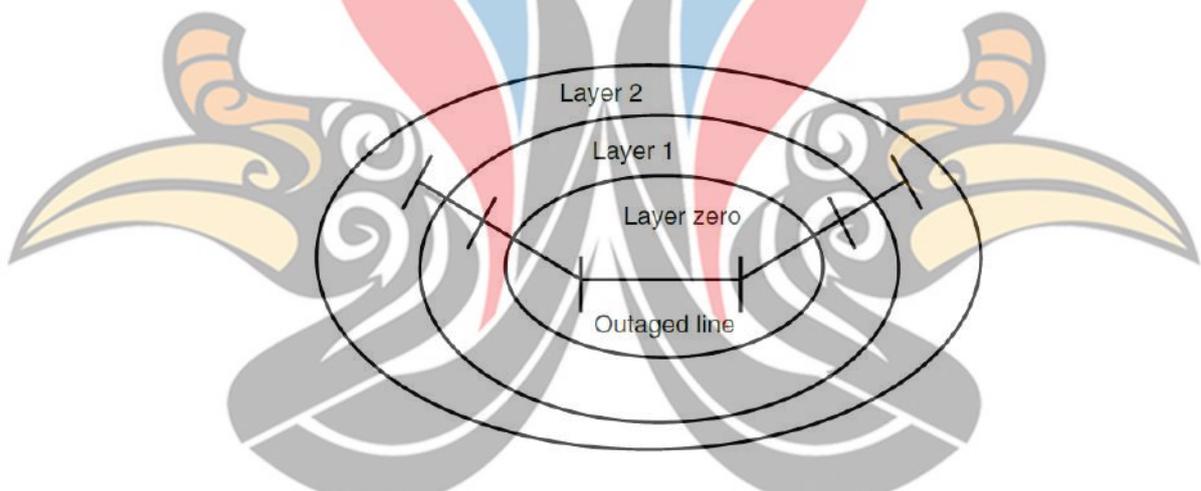
Analisis Kontingensi adalah suatu analisis untuk memprediksi kondisi sistem pasca terjadinya pelepasan (*outage*) baik berupa pelepasan saluran maupun generator. Analisis kontingensi dilakukan untuk memprediksi kejadian terburuk pada sistem tenaga listrik apabila terjadinya kegagalan pada sistem tenaga listrik. Konsep kontingensi sendiri di perkenalkan oleh Ejebe dan Wollenberg. Analisis Kontingensi dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh gangguan terhadap kelayakan perubahan tegangan *bus* dan aliran daya saluran dengan membandingkan aliran daya dalam kondisi normal dengan aliran daya dalam kondisi kontingensi. Analisis kontingensi dapat digunakan untuk memprediksi kondisi suatu sistem baik setelah lepasnya satu bagian dari sistem (*single contingency*) atau beberapa bagian sistem secara beruntun (*multiple contingency*) (Wood dkk, 2014).

2.5 Metode Bounding

Sebuah penelitian oleh Brandwajn 1988 telah memecahkan permasalahan mengenai analisis kontingensi dengan mengidentifikasi saluran yang berpotensi

mengalami *overload* dengan mendeteksi pelanggaran batas daya aktif saluran. Penelitian ini menggunakan area yang telah disesuaikan di sekitar *outage* untuk memecahkan permasalahan *outage* yang mengakibatkan *overload*.. Sehingga untuk melakukan analisis dengan teknik *bounding*, maka subsistem pada sistem tenaga dibagi menjadi tiga bagian utama (Wood dkk, 2014):

1. N-1
Merupakan subsistem yang melingkupi saluran yang dilepas (*outaged*).
2. N-2
Merupakan subsistem eksternal yang tidak dibahas secara rinci.
3. N-3
Merupakan beberapa *bus* yang memisahkan subsistem N-1 dan N-2.



Gambar 2. 1 Subsistem dari Metode *Bouding* (Wood dkk, 2014)

Untuk menentukan masing-masing subsistem dari metode *bounding*, perlu dilakukan perhitungan untuk menentukan aliran daya awal pada sistem. Besarnya aliran daya awal pada sistem ditunjukkan pada persamaan (2.37) dan (2.38) (Wood dan Wollenberg, 1996).

$$f_{pq}^0 = \frac{1}{x_{pq}} (\theta_p - \theta_q) \quad (2.37)$$

$$\Delta f_{pq}^0 = \frac{1}{x_{pq}} (\Delta \theta_p - \Delta \theta_q) \quad (2.38)$$

$$\Delta f_{pq}^{\max} x_{pq} = (\Delta\theta_p - \Delta\theta_q)^{\max} \quad (2.39)$$

www.itk.ac.id

Pada persamaan (2.37) dan (2.38), nilai aliran daya awal dari bus p ke bus q (f_{pq}^0) berbanding terbalik dengan nilai reaktansi saluran bus p ke bus q dan berbanding lurus dengan besar perbedaan sudut fasa tegangan bus p dan bus q .

Setelah nilai aliran daya awal pada sistem ditentukan, selanjutnya menentukan nilai perubahan aliran daya maksimum pada sistem dengan persamaan (2.40).

$$\Delta f_{pq}^{\max} = \text{Batas Operasi} - f_{pq}^0 \quad (2.40)$$

Pada persamaan (2.39), nilai batasan subsistem N-2 ($|\Delta\theta_p - \Delta\theta_q|$) digunakan untuk memastikan bahwa saluran pada subsistem tersebut aman saat sistem mengalami gangguan akibat kejadian kontingensi.

Setelah nilai $|\Delta\theta_p - \Delta\theta_q|$ ditentukan, selanjutnya adalah menghitung nilai $|\Delta\theta_i - \Delta\theta_j|$. Nilai $\Delta\theta_i$ merupakan nilai perubahan sudut fasa tegangan ($\Delta\theta$) terbesar di subsistem N-3 dan $\Delta\theta_j$ merupakan nilai perubahan sudut fasa tegangan ($\Delta\theta$) terkecil di subsistem N-3. Untuk mendapatkan nilai $|\Delta\theta_i - \Delta\theta_j|$, terlebih dahulu mencari faktor sensitivitas dengan persamaan (2.41) (Zhu, 2009).

$$S_{l,mn} = \frac{x_l(X_{im} - X_{in})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \quad (2.41)$$

Pada persamaan (2.41), $S_{i,mn}$ merupakan nilai faktor sensitivitas saluran l yang menghubungkan bus n dan bus m . x_l merupakan nilai reaktansi saluran l , X_{in} merupakan nilai matriks $[X]$ bus baris ke i dan kolom ke n , X_{im} merupakan nilai matriks $[X]$ bus baris ke i kolom ke m , X_{nm} merupakan nilai matriks $[X]$ bus baris ke n kolom ke m , X_{mm} merupakan nilai matriks $[X]$ bus baris ke m kolom ke m , dan X_{nn} merupakan nilai matriks $[X]$ bus baris ke n kolom ke n .

www.itk.ac.id

Setelah nilai $S_{l,nm}$ didapatkan, selanjutnya adalah mencari nilai $\Delta\theta_i$ dan $\Delta\theta_j$ dengan persamaan (2.42) (Zhu, 2009).

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_i &= X_{im}\Delta P_n + X_{in}\Delta P_m \\
 &= (X_{im} - X_{in})\Delta P_m \\
 &= (X_{im} - X_{in}) \frac{P_{mn}}{1 - \frac{1}{x_i}(X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \\
 &= \frac{x_i(X_{im} - X_{in})P_{mn}}{x_i - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})}
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Sehingga berdasarkan persamaan di atas, maka dapat dikembangkan teorema seperti berikut (Brandwajn, 1988):

$$|\Delta\theta_i - \Delta\theta_j| < |\Delta\theta_p - \Delta\theta_q| \tag{2.43}$$

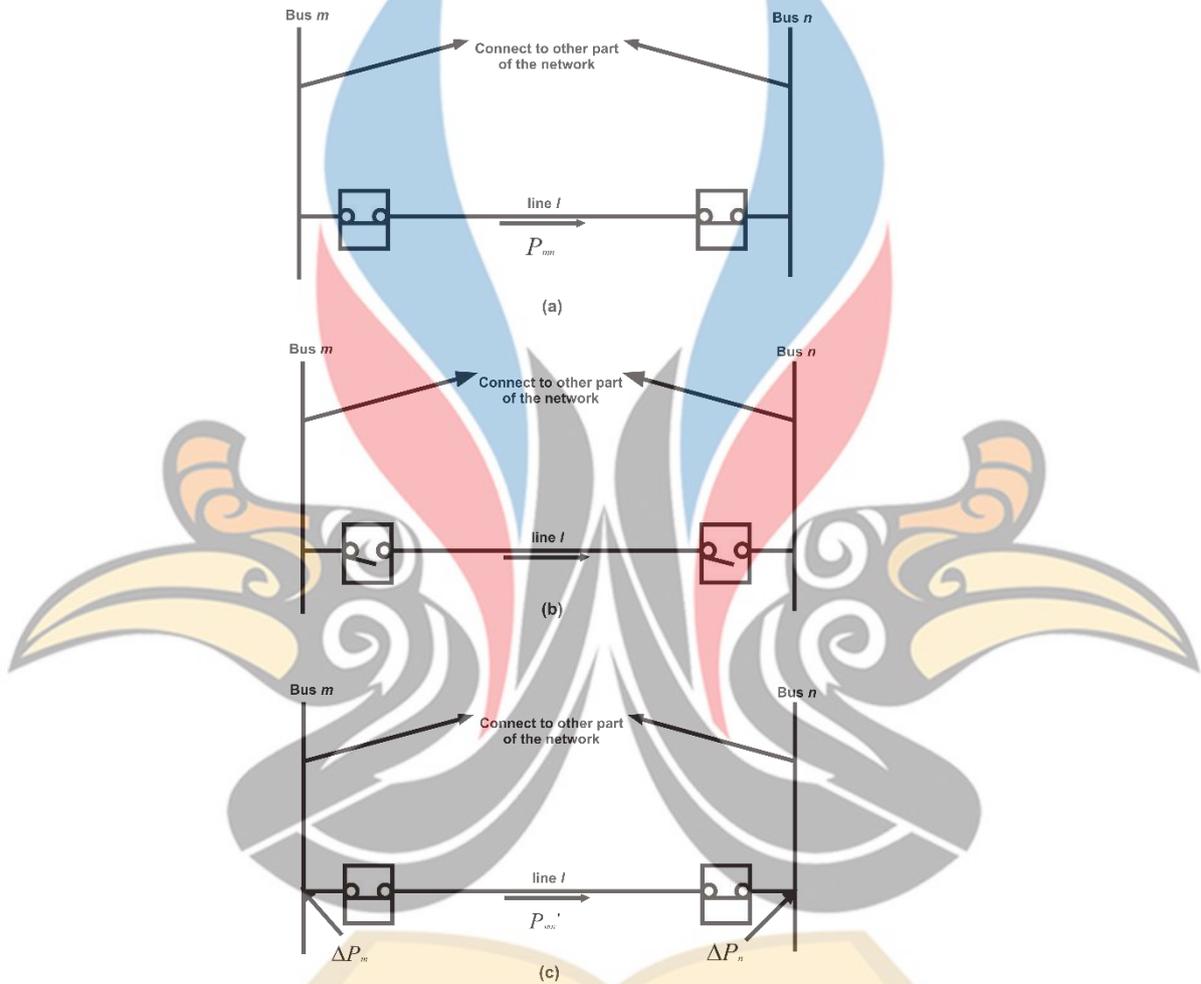
Dengan menggabungkan (2.39) dan (2.43), diperoleh:

$$\Delta f_{pq}^{\max} x_{pq} > |\Delta\theta_i - \Delta\theta_j| \tag{2.44}$$

Selanjutnya $\Delta\theta_i$ yang telah dihitung dikurangi dengan $\Delta\theta_j$. Hasil pengurangan tersebut akan dibandingkan dengan nilai $\Delta f_{pq}^{\max} x_{pq}$ terkecil dari sistem untuk memastikan bahwa subsistem N-1 dan N-3 merupakan subsistem yang meliputi semua kemungkinan terjadinya *overload*. Nilai dari $|\Delta\theta_i - \Delta\theta_j|$ harus lebih kecil dari nilai $\Delta f_{pq}^{\max} x_{pq}$ seluruh saluran sistem. Jika kondisi ini gagal terpenuhi, subsistem N-1 harus diperluas dan melakukan perhitungan kembali nilai $|\Delta\theta_i - \Delta\theta_j|$ pada subsistem N-3 yang baru serta melakukan pengujian ulang. Ketika subsistem N-2 telah dipastikan aman dari *overload* setelah dilakukan pengujian ulang, maka pengujian dinyatakan selesai dan hanya subsistem pada N-1 yang perlu dianalisis (Wood dan Wollenberg, 1996).

2.6 Line Outaged Distribution Factors

Faktor sensitivitas linear adalah faktor yang mengindikasikan besar perubahan aliran daya di saluran-saluran transmisi yang tersisa akibat lepasnya unit pembangkit atau saluran transmisi pada sistem (Wood dkk, 2014). Simulasi dari saluran lepas ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2.2 Ilustrasi Saluran Lepas Pada Jaringan Listrik (Zhu, 2009)

Gambar 2.2 (a) menunjukkan bus m yang mengalirkan daya menuju bus n melalui saluran l. Gambar 2.2 (b) menunjukkan saluran l yang menghubungkan bus m dan bus n terbuka (*open*) oleh *circuit breakers*. Gambar 2.2 (c) menunjukkan saluran l dimodelkan dengan menambahkan dua injeksi daya yang dikeluarkan dari tiap ujung akhir saluran. Ingat bahwa ketika *circuit breaker* terbuka, tidak ada arus yang mengalir dan saluran sepenuhnya *isolated* dari *network*. Maka nilai dari

perubahan sudut fasa tegangan pada bus m dan n akibat perubahan injeksi daya pada bus m dan n ditunjukkan pada persamaan (2.45) sebagai berikut (Zhu, 2009):

$$\Delta\theta = [X]\Delta P \quad (2.45)$$

Karena hanya injeksi daya pada bus m dan n yang akan berubah setelah saluran lepas dengan menambahkan dua injeksi daya pada sistem maka,

$$\Delta P = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \Delta P_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \Delta P_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Dengan demikian kita bisa mendapatkan perubahan dari sudut fasa pada bus m dan n yang dihubungkan oleh saluran l yang lepas,

$$\Delta\theta_m = X_{mn}\Delta P_n + X_{mm}\Delta P_m \quad (2.46)$$

$$\Delta\theta_n = X_{nn}\Delta P_n + X_{nm}\Delta P_m \quad (2.47)$$

Keterangan persamaan (2.46) dan (2.47):

θ_m : Sudut fasa pada bus m dari saluran l sebelum outage

θ_n : Sudut fasa pada bus n dari saluran l sebelum outage

P_{mn} : Daya yang mengalir pada saluran l dari bus m ke n sebelum outage

$\Delta\theta_m$: Perubahan sudut fasa pada bus m dari saluran l sebelum dan setelah outage

$\Delta\theta_n$: Perubahan sudut fasa pada bus n dari saluran l sebelum dan setelah outage

www.itk.ac.id

ΔP_{mn} : Perubahan aliran daya pada saluran l dari saluran l yang outage

θ'_m : Sudut fasa pada bus m dari saluran l setelah outage

θ'_n : Sudut fasa pada bus n dari saluran l setelah outage

P_{mn} : Daya yang mengalir pada saluran l dari bus m ke n setelah outage

Jika reaktansi saluran adalah x_l maka,

$$\Delta\theta_n = X_{nn}\Delta P_n + X_{nm}\Delta P_m \quad (2.48)$$

$$\Delta P_{mn} = \frac{1}{x_l}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_n) \quad (2.49)$$

karena $\Delta P_n = -\Delta P_m$, maka persamaan (2.48) dan (2.49) dapat dituliskan menjadi,

$$\Delta\theta_m = X_{mn}\Delta P_n + X_{mm}\Delta P_m = X_{mn}(-\Delta P_m) + X_{mm}\Delta P_m = (X_{mm} - X_{mn})\Delta P_m \quad (2.50)$$

$$\Delta\theta_n = X_{nn}\Delta P_n + X_{nm}\Delta P_m = X_{nn}(-\Delta P_m) + X_{nm}\Delta P_m = (X_{nm} - X_{nn})\Delta P_m \quad (2.51)$$

dimana,

$$X_{mn} = X_{nm} \quad (2.52)$$

sehingga,

$$\begin{aligned} \Delta P_{mn} &= \frac{1}{x_l}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_n) \\ &= \frac{1}{x_l}[(X_{mm} - X_{mn})\Delta P_m - (X_{nm} - X_{nn})\Delta P_m] \\ &= \frac{1}{x_l}(X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})\Delta P_m \end{aligned} \quad (2.53)$$

www.itk.ac.id

Aliran daya pada saluran l dari bus m ke bus n setelah *outage* adalah,

$$\begin{aligned} P'_{mn} &= P_{mn} + \Delta P_{mn} \\ &= P_{mn} + \frac{1}{x_l} (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn}) \Delta P_m \end{aligned} \quad (2.54)$$

Dari persamaan (2.53) dan (2.54) didapatkan,

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= P_{mn} + \frac{1}{x_l} (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn}) \Delta P_m \\ &= \frac{P_{mn}}{1 - \frac{1}{x_l} (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Karena hanya terdapat 2 elemen *nonzero* pada bus m dan n didalam injeksi daya, perubahan sudut fasa pada bus i (*any bus*) dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$\begin{aligned} \Delta \theta_i &= X_{im} \Delta P_n + X_{in} \Delta P_m \\ &= (X_{im} - X_{in}) \Delta P_m \\ &= (X_{im} - X_{in}) \frac{P_{mn}}{1 - \frac{1}{x_l} (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \\ &= \frac{x_l (X_{im} - X_{in}) P_{mn}}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \end{aligned} \quad (2.56)$$

dimana,

$$S_{i,l} = \frac{\Delta \theta_i}{\Delta P_l} = \frac{x_l (X_{im} - X_{in}) P_{mn}}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \quad (2.57)$$

Yang mana faktor sensitivitas dari perubahan sudut fasa dari bus i berdasarkan aliran daya pada saluran l sebelum *outage*. Untuk menghitung pengaruh dari lepasnya saluran l terhadap saluran lain u , *line outage distribution factor* ditentukan dengan persamaan berikut,

$$\begin{aligned} LODF_{u,l} &= \frac{\Delta P_u}{\Delta P_l} = \frac{\frac{1}{x_u} x_l (\Delta \theta_p - \Delta \theta_q)}{\Delta P_l} \\ &= \frac{1}{x_u} \left(\frac{\Delta \theta_p}{\Delta P_l} - \frac{\Delta \theta_q}{\Delta P_l} \right) \\ &= \frac{1}{x_u} (S_{p,l} - S_{q,l}) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Berdasarkan persamaan (2.57), nilai $S_{p,l}$, $S_{q,l}$ dapat dituliskan sebagai,

$$S_{p,l} = \frac{\Delta \theta_p}{\Delta P_l} = \frac{x_l (X_{pm} - X_{pn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \quad (2.59)$$

$$S_{q,l} = \frac{\Delta \theta_q}{\Delta P_l} = \frac{x_l (X_{qm} - X_{qn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \quad (2.60)$$

menjadi,

$$\begin{aligned} LODF_{u,l} &= \frac{1}{x_u} (S_{p,l} - S_{q,l}) \\ &= \frac{1}{x_u} \left(\frac{x_l (X_{pm} - X_{pn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} - \frac{x_l (X_{qm} - X_{qn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \right) \\ &= \frac{1}{x_u} \left(\frac{x_l (X_{pm} - X_{pn}) - x_l (X_{qm} - X_{qn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \right) \\ &= \frac{1}{x_u} \left(\frac{x_l (X_{pm} - X_{qm} - X_{pn} + X_{qn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \right) \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$= \left(\frac{\frac{x_l}{x_u} (X_{pm} - X_{qm} - X_{pn} + X_{qn})}{x_l - (X_{mm} + X_{nn} - 2X_{mn})} \right)$$

LODF merupakan faktor pelepasan saluran distribusi yang digunakan untuk menguji *overload* pada saat sistem transmisi yang mengalami gangguan. Jika saluran u adalah saluran yang menghubungkan bus n dan bus m , dan saluran l adalah saluran yang menghubungkan bus p dan bus q , maka LODF didapatkan dengan persamaan (2.61) (Zhu, 2009).

Setelah nilai LODF dihitung, selanjutnya adalah mencari nilai aliran daya setelah pelepasan saluran. Aliran daya setelah pelepasan beban didapatkan dengan persamaan berikut (Wood dan Wollenberg, 1996):

$$f_{pq}^{mn} = f_{pq}^0 + (LODF_{l,u} \times f_{mn}^0) \quad (2.62)$$

Pada persamaan (2.62), f_{pq}^{mn} merupakan aliran daya dari bus p ke bus q setelah pelepasan saluran dari bus m ke bus n . f_{pq}^0 merupakan aliran daya pada bus p ke bus q sebelum pelepasan saluran dan f_{mn}^0 merupakan aliran daya pada bus n ke bus m yang lepas sebelum pelepasan saluran.

2.7 Satuan Per-Unit (PU)

Dalam menyederhanakan proses analisis pada sistem interkoneksi tenaga listrik yang terdiri dari berbagai macam satuan, insinyur sistem tenaga telah menetapkan sistem per-unit dimana berbagai macam kuantitas fisik seperti daya, tegangan, arus, dan impedansi diungkapkan dalam bentuk pecahan desimal (Saadat, 1999). Nilai per-unit dari tiap kuantitas didefinisikan sebagai berikut:

$$\text{Kuantitas per - unit} = \frac{\text{Nilai Aktual Kuantitas}}{\text{Nilai Base Kuantitas}} \quad (2.63)$$

Dimana nilai aktual merupakan dapat berupa bilangan kompleks dan nilai *base* berupa bilangan *real*.

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 menunjukkan rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang dilakukan

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	Syafii dan Rahmawati, 2012	Analisis Kontingensi dengan Metode <i>Bounding</i> Pada Sistem IEEE 30 <i>Bus</i> Hasil: Terdapat sebanyak 12 saluran yang mengalami <i>overload</i> saat kejadian kontingensi pada sistem IEEE 30 <i>bus</i> . Saluran yang mengalami <i>overload</i> merupakan saluran yang berada di dalam subsistem N-1 hasil <i>bounding</i> .
2	Sekhar dan Mohanty, 2013	Analisis Kontingensi dengan Metode <i>Performance Index</i> dan <i>Aliran Daya Newton Raphson</i> Pada Sistem IEEE 5 <i>Bus</i> . Hasil: Saluran dengan indeks performa tertinggi mempunyai kemungkinan terbesar bekerja melebihi batas operasi maksimum. Sehingga metode ini mampu membantu operator untuk mengambil langkah cepat agar sistem tetap dapat bekerja.
3	Kumar, 2015	Analisis Kontingensi dengan Metode P_{ip} (<i>Active Power Performance Index</i>), P_{iv} (<i>Reactive Power Performance Index</i>). Hasil: Kalkulasi dari metode <i>performance index</i> menunjukkan jika saluran dengan nilai indeks P_{ip} dan P_{iv} tertinggi mempunyai potensi besar untuk mengalami <i>overload</i> saat terjadi <i>single/double line outage</i> pada sistem IEEE 25 <i>bus</i> .
4	Chen, 2017	Analisis Kontingensi dengan <i>Parallel Post Processing Techniques</i> Hasil: Dapat melakukan analisis kontingensi dalam skala besar dan informasi keluaran alat visual berbasis web.
5	Monice dkk, 2019	Analisis Kontingensi Sistem Kelistrikan Riau dengan Metode <i>Aliran Daya Newton Raphson</i> Hasil: Saat terjadi kontingensi, 12 <i>bus</i> mengalami <i>drop</i> tegangan dan 1 saluran mengalami kenaikan daya aktif.
6	Wulan, 2020	Analisis Kontingensi Sistem Mahakam 150 kV dengan Metode <i>Bounding</i> Hasil: -