

PENENTUAN STATUS OPERASI SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN PERFORMANCE INDEX

Kasus : Sistem Tenaga Sumbar-Riau

Riko Nofendra

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas Padang,

Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat

Email : riko_nofendra@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Keandalan dan kinerja sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh kondisi keamanan sistem. Analisis keamanan sistem tenaga bertujuan untuk melihat ketangguhan sistem terhadap gangguan yang terjadi, dan menjaganya tetap beroperasi pada kondisi normal. Analisis ini didasarkan pada analisis kontingensi, yang merupakan suatu cara untuk memodelkan setiap gangguan yang mungkin terjadi. Salah satu hal penting dalam analisis kontingensi adalah menentukan daftar kontingensi, yang berisikan kasus-kasus yang diprioritaskan untuk diperiksa secara mendalam, dikarenakan besarnya dampak gangguan tersebut. Untuk itu diperlukan suatu indikator penentu tingkat keparahan yang ditimbulkan suatu kasus kontingensi. Dalam penelitian ini dipakai performance index (PI) sebagai indikator yang dimaksud. Dengan menggunakan hasil analisis aliran daya Newton-Rhapson, perhitungan untuk mencari nilai PI dilakukan. Dari perhitungan yang dilakukan pada sistem tenaga Sumbar-Riau diperoleh bahwa untuk kontingensi generator, orde pangkat m dan n adalah 1 dan 2 yang memberikan daftar kontingensi yang konsisten dan feasible. Dan untuk kontingensi saluran, orde m dan n adalah 3 dan 4. Sedangkan daerah 'siaga' untuk masing-masing orde pangkat diwakili oleh nilai-nilai PI berikut : $7 < PI < 10$ untuk $m = n = 1$, $4 < PI < 8$ untuk $m = n = 2$, $2.6 < PI < 5$ untuk $m = n = 3$, dan $2.2 < PI < 4.6$ untuk $m = n = 4$.

Keyword : analisis kontingensi, metode Newton-Rhapson, performance index, status operasi sistem tenaga.

1. PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik yang sedang beroperasi normal dapat mengalami gangguan atau perubahan kondisi, seperti keluarnya unit pembangkit, terbukanya cabang jaringan, terjadinya pelepasan beban secara tiba-tiba, dan lain-lain. Efek dari gangguan tersebut akan menyebabkan perubahan aliran daya pada cabang-cabang lain dan atau perubahan besar tegangan pada bus-bus lain. Jika perubahan-perubahan tersebut berada diluar batas yang diperbolehkan (batas thermal dan limit stabilitas untuk cabang yang panjang, serta batasan maksimum dan minimum untuk tegangan pada bus), maka kondisi ini merupakan pelanggaran (*violation*) terhadap batasan kerja sistem. Jika kondisi ini tetap berlangsung, maka akan terjadi pelepasan bertingkat (*cascade*) pada sistem, yang akhirnya dapat menyebabkan sistem padam total (*blackout*).

Studi yang berkaitan dengan usaha-usaha untuk mencegah terjadinya kondisi-kondisi yang tidak diinginkan di atas dinamakan analisis keamanan sistem tenaga (*system security*). Salah satu fungsi penting yang dijalankan dalam analisis keamanan ini adalah memodelkan setiap gangguan yang mungkin terjadi, yang disebut juga dengan analisis kontingensi (*contingency analysis*). Dari analisis kontingensi ini diharapkan dapat diperoleh informasi tentang perkiraan keadaan sistem, jika kondisi gangguan itu benar-benar terjadi. Hasil analisis ini

selanjutnya digunakan oleh operator untuk menentukan langkah persiapan atau tindakan pemulihan yang tepat, sehingga sistem masih dapat dioperasikan dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Untuk keperluan keamanan dalam operasi sistem tenaga, hasil analisis kontingensi harus diperoleh dengan cepat. Jika kasus kontingensi yang dipilih merupakan semua gangguan yang mungkin terjadi, tentunya persyaratan ini tidak akan terpenuhi, walaupun beberapa teknik aliran daya yang memiliki proses komputasi yang cepat telah digunakan untuk analisis ini. Oleh karena itu diperlukan pemeriksaan pendahuluan untuk menentukan daftar kontingensi yang layak (*credible*) untuk dianalisis secara lengkap.

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan suatu besaran (indeks) sebagai dasar dalam menentukan daftar kontingensi yang layak tersebut. Besaran yang disebut juga performance index (PI) ini, dianggap dapat mewakili maksud tersebut. PI memang tidak secara jelas memperlihatkan jenis pelanggaran yang terjadi; beban lebih atau violasi tegangan, namun hanya menunjukkan besarnya dampak gangguan secara relatif antara satu kontingensi terhadap yang lainnya. Makin besar nilai PI, makin besar pula dampak dari suatu kasus kontingensi. Dengan diwakilinya tiap kasus kontingensi oleh suatu besaran skalar (nilai PI), maka selanjutnya kasus-kasus tersebut dapat diurutkan dari nilai PI yang

terbesar hingga yang terkecil, untuk mendapatkan daftar kontingensi yang dimaksud.

Merujuk pada formula yang dipakai untuk mendapatkan nilai PI[1, 4, 13], maka permasalahan lainnya adalah menentukan orde pangkat m dan n yang paling "tepat" untuk sistem yang dianalisis. Pengertian tepat disini meliputi konsistensi daftar kontingensi yang diperoleh, untuk semua kondisi beban, dan juga feasibilitas daftar kontingensi jika dibandingkan dengan kondisi sebenarnya dari hasil analisis aliran daya.

2. PEMODELAN SISTEM TENAGA DAN STUDI ALIRAN DAYA

Sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai suatu sistem jaringan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat listrik seperti : generator, transformator, saluran transmisi, dan beban yang saling berhubungan serta membentuk suatu sistem. Dalam pembahasan selanjutnya dipakai istilah sistem tenaga untuk menyatakan sistem tenaga listrik.

Dalam sistem tenaga, permasalahan yang umum dijumpai adalah studi aliran daya, studi ekonomis, studi hubung singkat, dan studi stabilitas. Untuk dapat melakukan suatu analisis terhadap permasalahan-permasalahan tersebut di atas, maka perlu dibuat pemodelan komponen-komponen sistem tenaga, kemudian digabungkan dengan sifat-sifat jaringan dan selanjutnya diturunkan model matematikanya sesuai dengan studi yang dilakukan.

Sistem tenaga tiga fasa yang seimbang dapat dianalisis secara per fasa dengan membuat model diagram satu garis. Dalam studi aliran tiga fasa, sistem tenaga dianggap dalam keadaan seimbang sehingga pemodelan dengan diagram satu garis dapat dilakukan untuk menyederhanakan permasalahan. [5, 7, 9]

2.1 Pemodelan Generator Sinkron

Untuk analisis aliran daya, generator sinkron dimodelkan dengan sumber daya aktif tertentu dan tegangan terminal yang konstan jika limit pembangkitan daya reaktif tidak dilanggar. Pada bus referensi, generator dinyatakan dengan tegangan dan sudut fasa yang tetap.

$$P_g = V_g \sum_{k=1}^n V_k (G_{gk} \cos(\theta_{gk}) + B_{gk} \sin(\theta_{gk})) \quad (2.1)$$

$$Q_g = V_g \sum_{k=1}^n V_k (G_{gk} \sin(\theta_{gk}) - B_{gk} \cos(\theta_{gk})) \quad (2.2)$$

dengan :

- V_g dan V_k adalah tegangan pada bus g dan k
- P_g dan Q_g adalah daya aktif dan reaktif yang dihantarkan terminal generator
- G_{gk} adalah konduktansi saluran transmisi g - k
- B_{gk} adalah susceptansi saluran transmisi g - k
- θ_{gk} adalah perbedaan sudut antara bus g dan k .

Pada persamaan di atas, limit Q_g dapat diawasi. Ketika limit tersebut dilewati, maka tegangan terminal akan dibiarkan bervariasi dan Q_g ditahan pada nilai limitnya tersebut.

2.2 Pemodelan Saluran Transmisi

Dalam sistem tenaga, saluran transmisi dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok, yaitu:

- saluran pendek (sampai dengan 80 km)
- saluran menengah (antara 80 km sampai dengan 200 km)
- saluran panjang (lebih dari 200 km).

Pada pemodelan saluran pendek, kapasitansi *shunt* saluran dapat diabaikan sehingga dapat direpresentasikan dengan impedansi seri. Sedangkan untuk saluran menengah dan saluran panjang, dimodelkan dengan menggunakan rangkaian Π ekuivalen.

2.3 Pemodelan Beban

Dalam sistem tenaga, ada dua macam pemodelan beban yaitu beban statis dan beban dinamis.

1. Model Beban Statis

Model beban statis adalah model yang merepresentasikan daya aktif dan reaktif sebagai fungsi dari tegangan bus dan frekuensi. Respons beban statis terhadap perubahan tegangan dan frekuensi tercapai dengan cepat, sehingga cenderung kondisinya dalam keadaan tunak. Model beban statis biasanya digunakan untuk komponen beban statis seperti beban resistif dan beban penerangan, dan juga kadang-kadang digunakan untuk pendekatan terhadap komponen beban dinamis.

2. Model Beban Dinamis

Model beban dinamis adalah model yang merepresentasikan daya aktif dan reaktif mengikuti dinamika variabel sistem, sehingga kondisinya bisa berubah-ubah setiap saat. Persamaan differensial biasanya digunakan untuk merepresentasikan model seperti ini.

2.4 Pemodelan Transformator Daya

Pada trafo daya, arus melalui reaktansi magnetisasi (X_m) dan rugi inti besi (R_m) jauh lebih kecil dibandingkan dengan arus beban, sehingga X_m dan R_m dapat diabaikan. Dengan kata lain sirkuit eksitasi pada trafo daya dapat diabaikan, sehingga dimodelkan sebagai impedansi Z .

Dalam suatu sistem tenaga sering diinginkan tegangan berada dalam batas-batas tertentu. Untuk itu diperlukan suatu transformator dengan posisi tap dapat diubah. Transformator yang digunakan untuk ini biasanya transformator oto dan transformator dua belitan (*two winding transformer*). Agar pengaturan tegangan dapat lebih baik biasanya pengaturan

posisi tap transformator dilakukan di sisi tegangan tinggi.

2.5 Studi Aliran Daya

Dengan semakin tingginya tingkat kebutuhan manusia terhadap tenaga listrik, maka para pakar tenaga listrik selalu terus berupaya melakukan studi untuk meningkatkan mutu pelayanan tenaga listrik dari pembangkit ke konsumen. Salah satu studi ini yang disebut studi aliran daya sangat banyak manfaatnya baik untuk perencanaan sistem tenaga maupun pengembangannya, juga untuk studi ekonomis, proteksi, hubung singkat ataupun studi stabilitas.

Banyak metoda yang sudah diteliti untuk mendapatkan kecepatan dan ketepatan algoritma serta memori (kebutuhan wadah) yang sedikit dari komputer. Metode yang sudah ada sampai saat ini seperti Gauss-Seidel, Newton-Rhapson, Decoupled Newton-Rhapson, dan Fast Decoupled Newton-Rhapson. Masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan baik dari segi kecepatan konvergensi, jumlah iterasi tergantung pada jumlah bus, kemudahan operasi matematik, lamanya waktu per iterasi, kemudahan penyusunan program komputer, ketepatan maupun jumlah memori yang dipakai.

Secara umum studi aliran daya dalam sistem tenaga bertujuan untuk : [5, 7]

1. Memeriksa tegangan pada setiap bus yang dapat memenuhi batas-batas yang diizinkan. Variasi tegangan yang diizinkan adalah ± 5% sampai ± 10%.
2. Mengevaluasi kapasitas semua elemen yang ada dalam sistem untuk melihat tingkat kemampuan penyaluran daya yang diizinkan.
3. Memperoleh kondisi mula untuk studi-studi lain, seperti perhitungan hubung singkat, studi ekonomis dan kestabilan.

2.6 Metoda Newton-Rhapson [2, 5, 7, 10, 13]

Solusi aliran daya di sistem jaringan listrik dapat dihitung bila tegangan pada masing-masing bus jaringan telah diketahui. Jadi masalah utama perhitungan aliran daya adalah menghitung tegangan di masing-masing bus bila sumber arus injeksi pada masing-masing bus diketahui. Tetapi dalam perhitungan aliran daya, biasanya yang diketahui adalah injeksi daya, sehingga masalahnya hanya dapat diselesaikan dengan iterasi. Tegangan di setiap bus terdiri dari dua besaran yaitu besarnya IVI dan sudut fasa, sehingga bila ada n bus pada sistem tenaga akan ada 2n buah besaran (status) yang harus ditentukan.

Dalam studi aliran daya dikenal 3 tipe bus, yaitu:

1. Bus P-Q yang disebut juga bus beban. Pada bus ini baik daya aktif maupun daya reaktif dua-duanya diketahui.
2. Bus P-V disebut juga bus pembangkit, dimana daya aktif dan besar tegangan diketahui.

3. Bus ayun atau dikenal juga sebagai bus penadah (*slack*) atau bus referensi. Disini kedua besaran tegangan yaitu besar dan sudutnya diketahui.

Dalam studi aliran daya, metoda Newton mempunyai konvergensi yang baik, tetapi lambat dalam komputasi karena memerlukan faktorisasi ulang pada matriks Jacobian pada setiap iterasi, dan memerlukan memori komputer yang cukup besar.

Dalam persamaan aliran daya diketahui :

$$\Delta P = P^{tetap} - P^{hitung} = 0 \tag{2.3}$$

$$\Delta Q = Q^{tetap} - Q^{hitung} = 0 \tag{2.4}$$

dimana

$$P_k^{hitung} = |V_k| \sum_{m \in \Gamma(k)} ((G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) |V_m|)$$

$$Q_k^{hitung} = |V_k| \sum_{m \in \Gamma(k)} ((G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) |V_m|)$$

Metoda Newton Rhapson menyelesaikan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V / |V| \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V / |V| \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

dimana untuk $k \neq m$:

$$H_{km} = L_{km} = |V_k| |V_m| (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$N_{km} = -M_{km} = |V_k| |V_m| (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

untuk $k = m$:

$$H_{kk} = -Q_k - B_{kk} |V_k|^2 \tag{2.9}$$

$$L_{kk} = Q_k - B_{kk} |V_k|^2 \tag{2.10}$$

$$N_{kk} = P_k + G_{kk} |V_k|^2 \tag{2.11}$$

$$M_{kk} = P_k - G_{kk} |V_k|^2 \tag{2.12}$$

Untuk setiap iterasi, vektor $|\theta|$ dan $|V|$

diperbaharui sebagai berikut :

$$|\theta| = |\theta_0| + [\Delta \theta] \tag{2.13}$$

$$|V| = |V_0| + [\Delta V] \tag{2.14}$$

Untuk menghitung aliran daya pada cabang, digunakan persamaan :

$$P_{km} = G_{km} \cdot V_k \cdot (V_k - V_m \cdot \cos \theta_{km}) - B_{km} \cdot V_k \cdot V_m \cdot \sin \theta_{km}$$

$$P_{km} = V_k^2 \cdot G_{km} - V_k \cdot V_m \cdot G_{km} \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \sin \theta_{km} \tag{2.15}$$

$$Q_{km} = B_{km} \cdot V_k (V_m \cdot \cos \theta_{km} - V_k) - G_{km} \cdot V_k \cdot V_m \sin \theta_{km} - V_k^2 \cdot Y_{C_{km}}$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \cdot B_{km} + V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot G_{km} \sin \theta_{km} - V_k^2 \cdot Y_{C_{km}} \tag{2.16}$$

3. ANALISIS KONTINGENSI DAN NILAI PI

3.1 Keamanan Sistem Tenaga [13]

Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisasi biaya operasi, faktor penting lainnya adalah menjaga keamanan (*security*) dalam operasinya. Salah satu tindakan pengamanan sistem tenaga yang amat diperlukan adalah menjaga agar saluran transmisi maupun transformator daya tidak ada yang mengalami pembebanan lebih, terutama bila terdapat satu atau beberapa elemen sistem yang terganggu. Pembebanan yang berlebihan tersebut akan mengakibatkan jatuh tegangan pada elemen yang bersangkutan bertambah. Akibatnya tegangan pada beberapa bus dalam sistem tenaga tersebut menurun. Penurunan tegangan pada setiap bus harus dikontrol, agar tidak melebihi harga yang ditetapkan.

Pada suatu pusat pengatur operasi (*operation control center*), upaya untuk menjaga keamanan sistem dilakukan dalam 3 tahap yaitu:

1. Pemantauan sistem (*system monitoring*).

Pemantauan sistem adalah identifikasi *on-line* dari kondisi sistem tenaga yang sebenarnya. Untuk mendapat informasi *real-time* tentang sistem, belakangan telah dikembangkan sistem telemetri yang dinamai SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) systems. Hasil dari pemantauan ini kemudian diproses untuk memperkirakan kemungkinan-kemungkinan yang dapat terjadi untuk selanjutnya dilakukan tindakan pencegahan ataupun perbaikan yang diperlukan.

2. Analisis kontingensi (*contingency analysis*).

Dalam analisis ini gangguan yang mungkin terjadi pada sistem dimodelkan, sehingga bisa diambil tindakan yang diperlukan, jika benar-benar terjadi.

3. Analisis untuk tindakan pemulihan (*corrective action analysis*).

Salah satu bentuk analisis ini dikenal dengan istilah SCOPF (*Security-Constrained Optimal Power Flows*). Dalam SCOPF, analisis kontingensi digabungkan dengan aliran daya optimal diikuti dengan melakukan beberapa penyesuaian, sehingga tidak ada lagi pelanggaran saat terjadi gangguan.

Dalam melakukan analisis keamanan, diperlukan informasi-informasi seperti pemantauan keamanan, daftar peralatan yang sedang dalam kondisi perawatan, daftar kontingensi serta batasan-batasan keamanan.

3.2 Metoda Analisis Kontingensi Sistem Tenaga

Teknik analisis kontingensi dari tahun ke tahun berkembang terus seiring dengan perkembangan komputer. Walaupun ada metode aliran daya yang lebih baik seperti Gauss-Seidel dan Newton-Rhapson yang bisa mempercepat proses komputasi, namun untuk menganalisis sistem dengan

mensimulasi satu persatu gangguan pada saluran dan pembangkit, akan memakan waktu yang lama. Untuk itu khusus untuk analisis kontingensi ini, dikembangkan beberapa metode yang latar belakangnya bermula dari analisis aliran daya.

Ada 2 metoda analisis kontingensi : [12]

1. Analisis kontingensi deterministik.

Yaitu cara penganalisan dengan membuat simulasi terlepasnya elemen dari sistem tenaga misalnya satu saluran dilepas atau satu trafo dilepas atau satu unit pembangkit dilepas, serta melihat pengaruh yang diakibatkannya.

Beberapa metoda analisis kontingensi deterministik yang dikenal saat ini yaitu:

1. Analisis kontingensi dengan menggunakan aliran daya arus searah (*DC Power-Flow Contingency Analysis*)

Metoda ini paling sederhana tetapi hasil yang diberikan kurang akurat. Dapat digunakan untuk menganalisis kontingensi tunggal atau kontingensi multi. Pada metoda ini, resistansi saluran diabaikan sehingga daya reaktifnya dapat diabaikan dan didapatkan model rangkaian linearnya ($P-\theta$).

Dengan aliran daya DC ini, dikembangkan beberapa metoda, diantaranya:

- Analisis kontingensi dengan menggunakan faktor distribusi.
- Analisis kontingensi dengan menggunakan indeks perilaku (*PI Methods*).

2. Analisis kontingensi dengan menggunakan matriks impedansi bus (*Z BUS*).

3. Analisis kontingensi dengan menggunakan metoda aliran daya Fast Decoupled Newton-Rhapson.

Dari persamaan daya kompleks yang non linear harus dicari tegangan dan sudutnya untuk tiap-tiap bus kecuali bus referensi. Dari persamaan aliran daya Newton-Rhapson, pemeriksaan dilanjutkan dengan mengamati arus pada setiap cabang dan membandingkannya dengan kemampuan maksimumnya. Tegangan pada setiap bus diamati pula apakah ada bus-bus dengan tegangan di bawah harga kritisnya.

2. Analisis kontingensi non-deterministik.

Penganalisan didasarkan pada tingkat keandalan sistem yang didefinisikan pada 2 indeks keandalan yaitu LOLP (*Loss-Of-Load-Probability*) dan EDNS (*Expected Values Of Demand Not Served*).

Keandalan sistem yang dimaksud tergantung kepada :

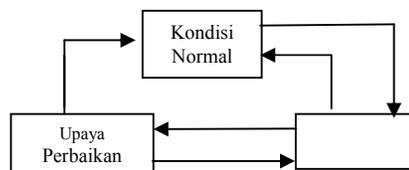
- Ketidakpastian perkiraan beban.
- Tingkat kepercayaan komponen/unit sistem tenaga.
- Jadwal pemeliharaan komponen/unit sistem tenaga.
- Kendala-kendala bagian yang terinterkoneksi.

Dengan kedua metoda di atas (LOLP dan EDNS), maka perencana sistem mampu menentukan kapasitas elemen sistem tenaga yang akan dievaluasi dengan menggunakan fungsi probabilitas kerapatan. Dengan teknik penganalisisan secara probabilistik ini dapat ditentukan bagian saluran yang mana yang dibebani lebih atau bus mana yang bertegangan abnormal tanpa mengevaluasi keseluruhan sistem. Dengan demikian diharapkan waktu komputasi lebih cepat dan pengevaluasian dapat dititikberatkan pada daerah dimana sering terjadi gangguan (*outage*).

3.3 Kondisi Operasi Sistem Tenaga [9]

Kondisi operasi dari suatu sistem tenaga dapat diklasifikasikan sebagai kondisi normal, kondisi darurat (*emergency*), dan kondisi untuk mengupayakan agar sistem kembali normal (*restorative*).

Kondisi normal adalah suatu keadaan dimana kebutuhan total dari sistem dapat dilayani dengan memenuhi semua batasan-batasan operasi. Gangguan atau menurunnya kemampuan unit pembangkitan, hubung singkat yang kemudian diikuti dengan terbukanya cabang, naiknya beban diluar perkiraan dan sebagainya, dapat menimbulkan dua bentuk kondisi darurat. Bentuk kondisi darurat pertama, sistem tetap stabil tetapi beroperasi dengan pelanggaran terhadap batasan operasi. Pada bentuk ini kebutuhan konsumen tetap dilayani, tetapi muncul kondisi tegangan dan frekuensi yang tidak normal (*abnormal*), batasan pembebanan dari cabang dan peralatan dilanggar dan sebagainya. Kondisi darurat ini dapat ditoleransi untuk periode waktu tertentu. Pada kondisi darurat yang kedua, sistem menjadi tidak stabil dan beban tidak sepenuhnya dapat disuplai. Bentuk kedua ini akan menyebabkan pelanggaran terhadap terhadap batasan pembebanan dan batasan-batasan operasi yang jika tidak dilakukan usaha perbaikan dengan segera, sistem akan menjadi padam total. Hubungan dari ketiga kondisi tersebut dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.1 Hubungan dari tiga kondisi dalam operasi sistem tenaga listrik

Dalam kondisi pemulihan kembali, upaya perbaikan dilakukan sedemikian sehingga sistem dapat kembali kepada kondisi normal sebelumnya, atau ke suatu kondisi normal yang baru. Pada kasus adanya saluran yang terbebani lebih atau tegangan abnormal pada bus, ada beberapa cara yang bisa dilakukan untuk mengatasinya, diantaranya adalah:

- Membuat penjadwalan baru pada bus generator agar distribusi daya lebih baik.

- Melepaskan beban yang tidak perlu.
- Menambah saluran baru atau mengganti saluran tersebut.
- Merobah posisi tap off-nominal trafo.
- Memasang sumber daya reaktif seperti kapasitor statis (kompensasi daya reaktif).

3.4 Perhitungan Nilai PI [1, 4, 13]

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, nilai performance index (PI) sebenarnya hanyalah gambaran dari tingkat keparahan yang ditimbulkan oleh suatu kasus kontingensi, dibandingkan dengan kasus kontingensi lainnya. Sedangkan informasi tentang jenis pelanggaran yang terjadi, overload pada saluran atau tegangan abnormal pada bus, tidak bisa ditentukan dari nilai ini. Oleh karena itu di dalam studi keamanan, nilai PI ini berfungsi sebagai informasi awal untuk menyusun daftar kontingensi yang akan diperiksa secara mendalam, terutama pada sejumlah kasus teratas pada daftar.

3.4.1 Formulasi Indeks

Pada sejumlah referensi [1, 4, 13], diperoleh formula untuk mendapatkan nilai PI, sebagai berikut:

$$PI = \sum_{\substack{\text{semuacaban } g \\ i}} \left(\frac{P_l}{P_l^{\max}} \right)^{2n} + \sum_{\substack{\text{semuabus} \\ i}} \left(\frac{\Delta|V_i|}{\Delta|V_i|^{\max}} \right)^{2m} \quad (3.1)$$

dimana :

- P_l, P_{lmax} = daya yang mengalir dan daya maksimum yang boleh dilewatkan pada saluran l ,
- $\Delta|V_i|, \Delta|V_i|^{\max}$ = beda tegangan dan beda tegangan maksimum yang diijinkan pada bus i ,
- m, n = faktor pangkat, yang harganya spesifik pada tiap sistem.

Bagian pertama dari formula di atas disebut sebagai pembebanan (*loading*) saluran. Sedangkan pada bagian ke-2, diambil toleransi beda tegangan sebesar $\pm 5\%$.

3.4.2 Pembebanan (*Loading*) dalam Performance Index

Untuk lebih mendekati kondisi sebenarnya, maka dalam penelitian ini pembebanan dinyatakan sebagai perbandingan arus yang mengalir pada saluran l dengan arus maksimum yang diperbolehkan melaluinya (kapasitas penyaluran arus atau *ampacity*). Dalam bentuk formula dituliskan sebagai berikut :

$$loading = \frac{I_l}{I_l^{\max}}$$

dimana : $I_l = \frac{P_l}{\sqrt{3} \cdot V_i \cdot \cos \phi} \quad (A) \quad ;$

$$\phi = \arccos \left(\frac{Q_l}{P_l} \right)$$

Sedangkan I_l^{max} (ampacity) diperoleh dari tabel Standar Nilai Karakteristik untuk Konduktor yang dikeluarkan oleh ACA (Aluminium Company of America), yang disesuaikan dengan jenis konduktor yang dipakai sebagai saluran transmisi. [6]

Tabel 3.1 Kapasitas Penyaluran Arus Penghantar ACSR

dimana : A = luas penampang penghantar

A (mm ²)	kcml	Ampacity (A)	derating 80% (A)
240	473	665	532
330	651	790	632
435	858	930	744

4. HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dilakukan perhitungan nilai PI terhadap sistem yang dipilih, yaitu Sistem Tenaga Listrik Sumbar-Riau. Dari data yang ada (kondisi awal), dilakukan penganalisisan terhadap 3 kondisi beban yaitu beban 100%, 110% dan 120% dari kondisi awal. Selanjutnya dengan menggunakan analisis aliran daya Newton-Rhapon dilakukan perhitungan terhadap kontingensi yang dipilih. Jenis kontingensi yang dipilih dalam penelitian ini adalah kontingensi tunggal yang tidak merubah jumlah bus dari sistem.

Perhitungan dilanjutkan dengan memeriksa persentase pembebanan saluran dan kondisi tegangan bus, untuk tiap-tiap kasus kontingensi. Dalam sistem yang dianalisis, jenis penghantar yang dipergunakan adalah ACSR (*Aluminium Cable Steel-Reinforced*), dengan luas penampang 240, 330, dan 435 mm². Sedangkan toleransi beda tegangan ditetapkan sebesar ± 5%. Selanjutnya dengan menetapkan orde pangkat m dan n sebesar 1, ..., 4, diperoleh nilai PI untuk tiap-tiap kasus.

Penganalisisan aliran daya pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan software Matpower versi 2.0 yang berbasis bahasa pemrograman Matlab, dari Cornell University. Pada lampiran diperlihatkan gambaran umum dari program ini.

4.1 Data Jaringan Sistem Sumbar-Riau

Data yang dipakai merupakan data PT.PLN (persero), Proyek Induk Pembangkit dan Penyalur Jaringan Sumbar-Riau. Data-data pendukung diantaranya:

- Σ pembangkit = 4 (1 slack bus)
- Σ saluran = 19
- Σ bus = 18
- MVA_{base} = 100 MVA
- KV_{base} = 150 KV (kecuali bus 16 dan 17, KV_{base} = 20 KV)
- Total beban = 292.6 MW dan 123 MVAR
- Kapasitas pembangkitan = 367.5 MW dan (-83 sampai +246) MVAR

4.1.1 Data bus

Tabel 4.1. Data bus Sistem Sumbar-Riau

No	Tipe	P _d (MW)	Q _d (MVAR)	V _m (pu)	V _a (°)	V _{base} (KV)
1	1	1.5	0.8	1	0	150
2	2	10	4	1.02	0	150
3	1	21.9	8	1	0	150
4	1	0	0	1	0	150
5	1	12	5	1	0	150
6	1	53	21	1	0	150
7	1	15	5	1	0	150
8	1	40	20	1	0	150
9	1	10	4	1	0	150
10	1	7.2	3	1	0	150
11	1	43.5	15	1	0	150
12	2	5	2.5	1.02	0	150
13	1	6.5	3.2	1	0	150
14	1	17	7	1	0	150
15	3	0	0	1.02	0	150
16	2	7	3	1.005	0	20
17	1	13	6.5	1	0	20
18	1	30	15	1	0	150

dimana :

- tipe bus : 1 = PQ bus ; 2 = PV bus ; 3 = slack bus
- P_d, Q_d : beban daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan (MW)
- V_m : magnitudo tegangan di bus (pu)
- V_a : sudut fasa tegangan (°)

Tabel 4.2. Data Pertambahan Beban

No Bus	110%		No Bus	110%		No Bus	120%		No Bus	120%	
	P _d	Q _d									
1	1.65	0.88	10	7.92	3.3	1	1.8	0.96	10	8.64	3.6
2	11	4.4	11	47.85	16.5	2	12	4.8	11	52.2	18
3	24.09	8.8	12	5.5	2.75	3	26.28	9.6	12	6	3
4	0	0	13	7.15	3.52	4	0	0	13	7.8	3.84
5	13.2	5.5	14	18.7	7.7	5	14.4	6	14	20.4	8.4
6	58.3	23.1	15	0	0	6	63.6	25.2	15	0	0
7	16.5	5.5	16	7.7	3.3	7	18	6	16	8.4	3.6
8	44	22	17	14.3	7.15	8	48	24	17	15.6	7.8
9	11	4.4	18	33	16.5	9	12	4.8	18	36	18

4.1.2 Data generator

Tabel 4.3. Data pembangkitan Sistem Sumbar-Riau

No Bus	P _g (MW)	Q _g (MVAR)	Q _{max} (MVAR)	Q _{min} (MVAR)	V _g (pu)	P _{max} (MW)
2	50	0	52.7	-15	1.02	68
12	90	0	72.3	-25	1.02	114
15	0	0	112.5	-40	1.02	175
16	9	0	8.5	-3	1.005	10.5

dimana:

- P_g, Q_g : daya aktif dan daya reaktif yang dibangkitkan (MW & MVAR),
- $Q_{max, min}$: batas maksimum & minimum pembangkitan daya reaktif (MVAR),
- V_g : tegangan bus yang ditetapkan (pu),
- P_{max} : batas maksimum pembangkitan daya aktif (MW).

4.1.3 Data saluran transmisi

Tabel 4.4. Data saluran Sistem Sumbar-Riau

No	Antara Bus	r (pu)	x (pu)	b _{tot} (pu)	Ampacity (A)
1	7-5 *	0.0089	0.0318	0.0105	532
2	5-6	0.0019	0.0066	0.0024	532
3	5-8 *	0.0018	0.0063	0.0026	532
4	8-1	0.0335	0.1205	0.0175	532
5	1-10	0.0013	0.0046	0.0009	532
6	10-9	0.0144	0.0518	0.0085	532
7	9-8	0.0179	0.0639	0.0093	532
8	7-15 *	0.0023	0.0111	0.0033	632
9	2-7 *	0.0149	0.0535	0.0155	532
10	2-3	0.0220	0.0762	0.0144	532
11	3-4	0.0168	0.0580	0.0110	532
12	4-12 *	0.0161	0.0779	0.0225	632
13	12-11	0.0192	0.1157	0.0229	744
14	12-13	0.0055	0.0330	0.0054	744
15	13-11	0.0132	0.0838	0.0187	744
16	11-14 *	0.0121	0.0433	0.0051	532
17	17-16	0.5575	1.2328	0.0001	532
18	4-17	0.0000	0.5555	0.0002	532
19	8-18	0.0009	0.0031	0.0025	532

dimana:

- ampacity : kemampuan hantar arus pada saluran (A), dengan mempertimbangkan derating sebesar 80 %,
- untuk saluran ganda (*), harga parameter saluran yang diberikan merupakan harga ekivalennya.

4.1.4 Kondisi Beban Awal (100%)

Untuk memberikan gambaran menyeluruh terhadap semua kasus yang dipilih, berikut ini akan diperlihatkan perhitungan terhadap 3 kasus yang berbeda : kondisi normal, kontingensi saluran dan kontingensi generator. Dengan menggunakan software Matpower versi 2.0, hasil perhitungan aliran daya dan nilai PI dapat diperlihatkan dalam beberapa tabel dan grafik di bawah. Diberikan juga informasi tentang tegangan minimum pada bus dan jumlahnya, serta pembebanan yang terbesar.

Tabel 4.5 Aliran Daya pada Kontingensi Generator

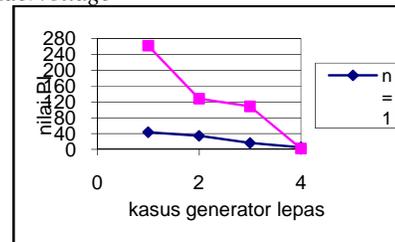
No	Kasus	V _{bus}	
		min (pu)	max (%)
1	Kontingensi G12*	0.853 (6)	88.7
2	Kontingensi G15*	0.894 (9)	72
3	Kontingensi G16*	0.845 (2)	62.1
4	Kontingensi G2	0.961	64.3

Tabel 4.6 Aliran Daya pada Kontingensi Saluran

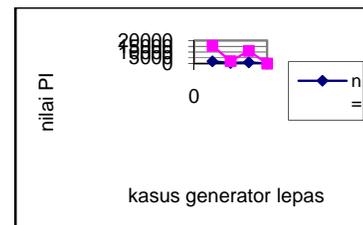
No	Kasus	V _{bus}	
		min (pu)	max (%)
1	Kontingensi 9-8	0.95	62.4
2	Kontingensi 8-1	0.957	62.5
3	Kontingensi 1-10	0.959	62.2
4	Kontingensi 10-9	0.962	62.3
5	Kontingensi 12-13	0.964	62.1
6	Kontingensi 12-11	0.964	62.1
7	Kontingensi 13-11	0.964	62.1
8	Normal	0.964	62.1

ket:

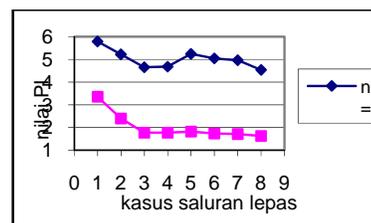
- tanda * : pada kasus kontingensi ini terdapat bus yang mengalami jatuh tegangan di bawah batas minimum yang diperbolehkan (*undervoltage*).
- V_{bus} (N) : jumlah bus yang mengalami *undervoltage*



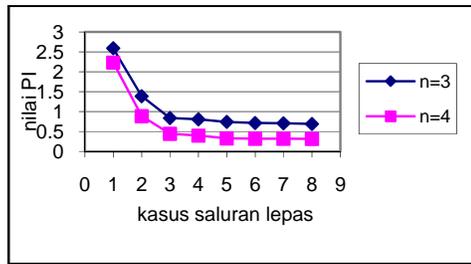
Gambar 4.1 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.2 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=3 dan 4



Gambar 4.3 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.4 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=3 dan 4

Pada gambar 4.1 yang merupakan plot nilai PI untuk kontingensi generator, terlihat bahwa grafik yang diperoleh menunjukkan kecenderungan yang monoton turun. Ini bermakna bahwa daftar kontingensi yang disusun berdasarkan nilai PI-nya untuk harga pangkat m=n=1 dan m=n=2, memenuhi persyaratan konsistensi dan feasibilitas yang diinginkan. Sedangkan pada gambar 4.2 terlihat bahwa grafik yang diperoleh menunjukkan sedikit “penyimpangan” dari kondisi monoton turun yang diharapkan. Ini mengindikasikan bahwa daftar kontingensi untuk m=n=3 dan 4 kurang memenuhi dua persyaratan yang diinginkan di atas.

Pada gambar 4.3 dan 4.4 yang merupakan representasi nilai PI untuk kontingensi saluran, diperlihatkan kondisi yang bertolak belakang dengan kasus kontingensi generator. Grafik yang menunjukkan kecenderungan monoton turun diperlihatkan untuk nilai m=n=3 dan 4, sedangkan untuk m dan n berharga 1 dan 2 ditunjukkan adanya “penyimpangan” seperti kasus sebelumnya. Sehingga bisa dikatakan bahwa untuk kasus kontingensi saluran, harga pangkat m dan n yang bisa dipakai untuk mendapatkan nilai PI adalah 3 dan 4.

4.3 Kondisi Beban 110%

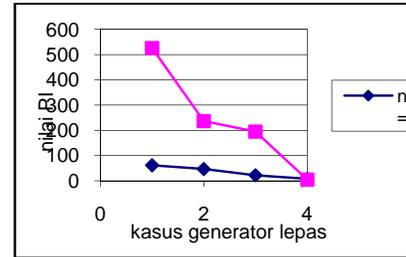
Dengan melakukan perhitungan yang sama dengan kondisi beban 100%, berikut ini diberikan tabel hasil perhitungan aliran daya dan grafik nilai PI untuk semua kasus kontingensi.

Tabel 4.7 Aliran Daya pada Kontingensi Generator

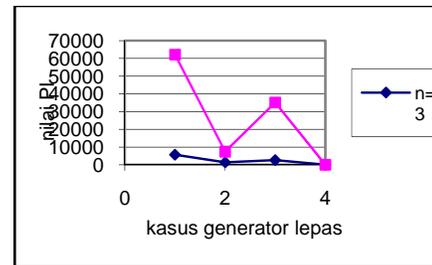
No	Kasus	V _{bus} min (pu)	Pembebanan max (%)
1	Kontingensi G12**	0.824 (7)	101
2	Kontingensi G15*	0.877 (9)	82
3	Kontingensi G16*	0.82 (2)	68.8
4	Kontingensi G2	0.954	73.9

Tabel 4.8 Aliran Daya pada Kontingensi Saluran

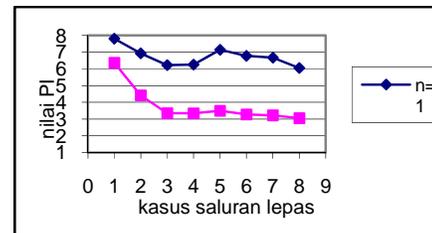
No	Kasus	V _{bus} min (pu)	Pembebanan max (%)
1	Kontingensi 9-8*	0.941 (3)	69.1
2	Kontingensi 8-1	0.95	69.2
3	Kontingensi 1-10	0.952	68.9
4	Kontingensi 10-9	0.955	68.9
5	Kontingensi 12-13	0.957	68.8
6	Kontingensi 12-11	0.957	68.8
7	Kontingensi 13-11	0.957	68.8
8	Normal	0.957	68.8



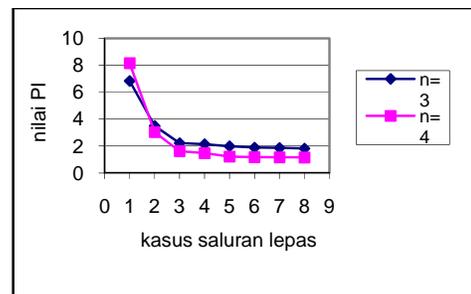
Gambar 4.5 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.6 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=3 dan 4



Gambar 4.7 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.8 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=3 dan 4

Dari grafik-grafik di atas terlihat kecenderungan yang sama dengan hasil-hasil yang didapat pada kondisi beban 100%. Untuk kontingensi generator, harga m dan n yang memenuhi syarat untuk dipakai dalam formulasi nilai PI adalah 1 dan 2. Sedangkan harga m = n = 3 dan 4 kurang memenuhi syarat untuk dipakai. Selanjutnya untuk kontingensi saluran, didapatkan 3 dan 4 sebagai harga pangkat yang bisa dipakai, sedangkan 1 dan 2 tidak disarankan untuk dipergunakan.

4.4 Kondisi Beban 120%

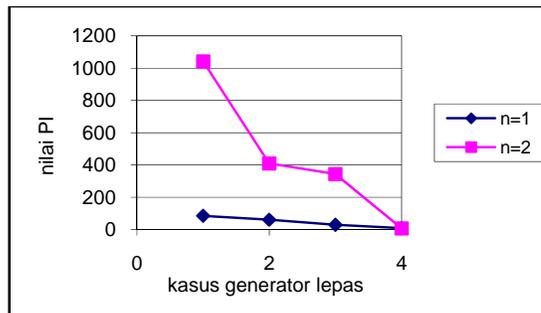
Di bawah ini diberikan tabel hasil perhitungan aliran daya dan grafik nilai PI untuk semua kasus kontingensi.

Tabel 4.9 Aliran Daya pada Kontingensi Generator

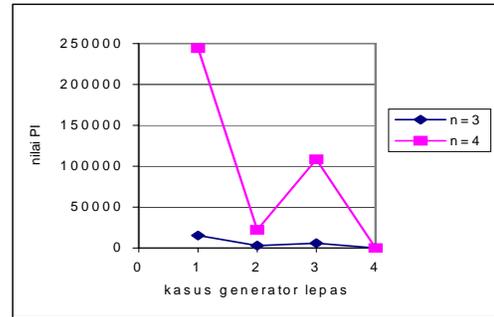
No	Kasus	V _{bus}	
		min (pu)	max (%)
1	Kontingensi G12**	0.791 (7)	115
2	Kontingensi G15*	0.858 (9)	91
3	Kontingensi G16*	0.792 (2)	75.6
4	Kontingensi G2*	0.947 (3)	83.6

Tabel 4.10 Aliran Daya pada Kontingensi Saluran

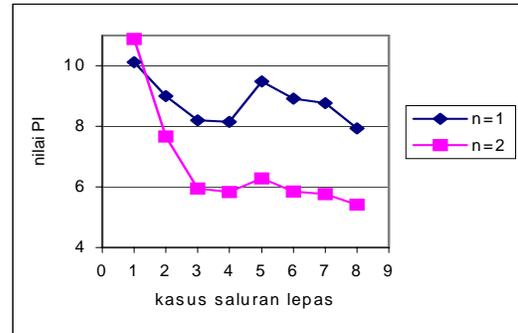
No	Kasus	V _{bus}	
		min (pu)	max (%)
1	Kontingensi 9-8*	0.933 (3)	75.8
2	Kontingensi 8-1*	0.942 (3)	76
3	Kontingensi 1-10*	0.945 (2)	75.6
4	Kontingensi 10-9*	0.948 (2)	75.8
5	Kontingensi 12-13	0.951	75.6
6	Kontingensi 12-11	0.951	75.6
7	Kontingensi 13-11	0.951	75.6
8	Normal	0.951	75.6



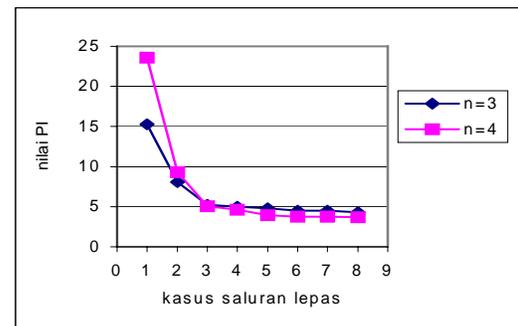
Gambar 4.9 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.10 Grafik nilai PI pada kontingensi generator untuk m=n=3 dan 4



Gambar 4.11 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=1 dan 2



Gambar 4.12 Grafik nilai PI pada kontingensi saluran untuk m=n=3 dan 4

Dari grafik-grafik di atas terlihat kecenderungan yang sama dengan hasil-hasil yang diperoleh sebelumnya. Untuk kontingensi generator, harga m dan n yang memenuhi syarat adalah 1 dan 2. Sedangkan harga m = n = 3 dan 4 kurang konsisten. Selanjutnya untuk kontingensi saluran, didapatkan 3 dan 4 sebagai harga pangkat yang bisa dipakai, 1 dan 2 tidak disarankan.

4.5 Penentuan Batas Status Operasi dengan Nilai PI

Setelah harga pangkat m dan n yang memenuhi kriteria untuk masing-masing kasus kontingensi diperoleh, maka tujuan berikutnya adalah menentukan nilai PI yang menjadi batas perubahan keadaan (status) operasi sistem. Diketahui sebelumnya bahwa harga pangkat m dan n yang

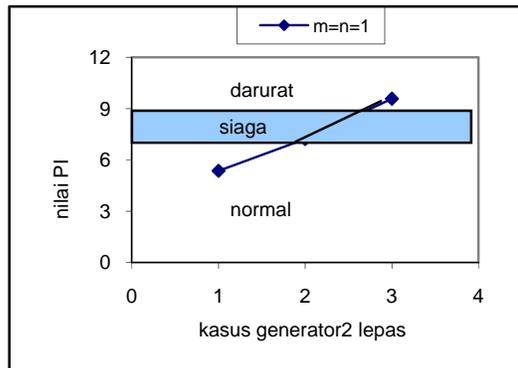
memenuhi kriteria untuk dipakai adalah 1 dan 2 untuk kontingensi generator, serta 3 dan 4 untuk kontingensi saluran.

Seiring dengan kenaikan beban maka kondisi aliran daya di saluran dan tegangan di bus pun mengalami perubahan. Makin besar beban maka tingkat keparahan yang ditimbulkan jika dilakukan kontingensi pada kondisi ini pun akan semakin besar. Karena besarnya nilai PI tergantung dari harga pangkat yang dipakai, maka berikut ini diperlihatkan kasus kontingensi yang menunjukkan mulainya terjadi perubahan keadaan sistem, dari keadaan tanpa pelanggaran ke keadaan dengan pelanggaran, untuk harga pangkat yang sama pada semua kondisi beban. Dari tabel nilai PI-nya akan dibuat grafik yang menggambarkan nilai batas status operasi yang diinginkan.

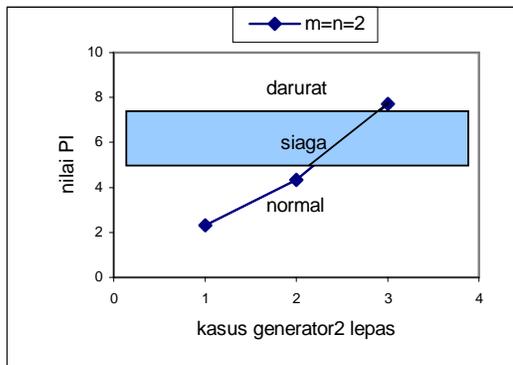
➤ Harga pangkat $m = n = 1$ dan $m = n = 2$:

Tabel 4.11 Nilai PI untuk Kontingensi Generator 2

No	Beban	Kasus		PI	
		Aman	Tidak	$m=n=1$	$m=n=2$
1	100%	Kont G2		5	2
2	110%	Kont G2		7	4
3	120%		Kont G2*	10	8



Gambar 4.13 Grafik nilai PI Sebagai Batas Status Operasi untuk $m = n = 1$



Gambar 4.14 Grafik nilai PI Sebagai Batas Status Operasi untuk $m = n = 2$

saat generator di bus 2 lepas untuk semua kondisi beban. Dari grafik dapat dibuatkan hasil berikut :

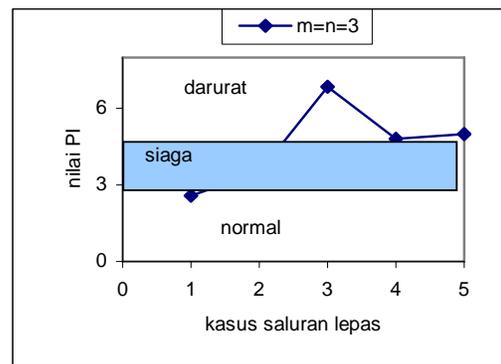
- $m = n = 1$:
 - $PI < 7$ kondisi normal
 - $7 < PI < 10$ kondisi siaga (*alert*)
 - $PI > 10$ kondisi darurat (*emergency*)
- $m = n = 2$:
 - $PI < 4$ kondisi normal
 - $4 < PI < 8$ kondisi siaga (*alert*)
 - $PI > 8$ kondisi darurat (*emergency*)

Dengan kata lain dari hasil di atas juga bisa dinyatakan bahwa daerah “siaga” dibatasi oleh nilai PI 7 dan 10 untuk harga pangkat $m = n = 1$, dan nilai PI 4 dan 8 untuk harga pangkat $m=n=2$.

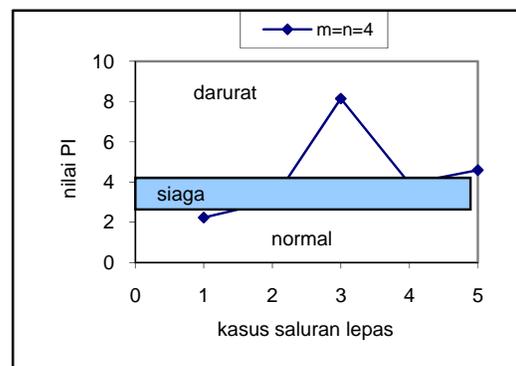
➤ Harga pangkat $m = n = 3$ dan $m = n = 4$:

Tabel 4.12 Nilai PI untuk Kontingensi Saluran

No	Beban	Kasus		PI	
		Aman	Tidak (V_{min})	$m=n=3$	$m=n=4$
1	100%	9-8		2.59	2.23
2	110%	8-1		3.50	3.04
3	110%		9-8* (0.941)	6.84	8.15
4	120%	12-13		4.80	3.93
5	120%		10-9* (0.948)	5.00	4.59



Gambar 4.15 Grafik nilai PI Sebagai Batas Status Operasi untuk $m = n = 3$



Gambar 4.16 Grafik nilai PI Sebagai Batas Status Operasi untuk $m = n = 4$

Dari data tabel di atas diketahui bahwa perubahan status operasi sistem terlihat dari perubahan kondisi

Dari data pada tabel dan grafik di atas dapat dituliskan hasil berikut :

- $m = n = 3$:
 - $PI < 2.6$ kondisi normal
 - $2.6 < PI < 5$ kondisi siaga (*alert*)
 - $PI > 5$ kondisi darurat (*emergency*)
- $m = n = 4$:
 - $PI < 2.2$ kondisi normal
 - $2.2 < PI < 4.6$ kondisi siaga (*alert*)
 - $PI > 4.6$ kondisi darurat (*emergency*)

Dengan kata lain bisa dikatakan bahwa daerah operasi “siaga” dibatasi oleh nilai PI 2.6 dan 5 untuk harga pangkat $m = n = 3$ dan nilai PI 2.2 dan 4.6 untuk $m = n = 4$.

5. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis pada bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai PI merupakan representasi tingkat keparahan yang ditimbulkan oleh suatu kasus kontingensi, relatif terhadap kontingensi lainnya. Oleh karena itu informasi tentang jumlah, letak, atau besarnya saluran yang *overload* dan atau bus yang *undervoltage* tidak bisa diperoleh berdasarkan nilai PI tersebut.
2. Dari 2 jenis kontingensi yang dilakukan diperoleh batasan orde pangkat m dan n dalam formulasi PI, sebagai berikut :
 - Untuk kontingensi generator lepas, harga m/n yang memberikan daftar kontingensi yang konsisten dan *feasible* adalah 1 dan 2.
 - Untuk kontingensi lepas cabang, harga m/n adalah 3 dan 4.
3. Berdasarkan nilai PI yang diperoleh, dapat ditemukan harga batas penentuan status operasi Sistem Sumbar-Riau :
 - Untuk kasus kontingensi generator lepas, diperoleh untuk orde pangkat $m = n = 1$, nilai PI antara 7 dan 10 menjadi daerah batas untuk status operasi ‘normal’ dan ‘darurat’. Dengan kata lain, nilai $7 < PI < 10$ merupakan daerah status ‘siaga’. Sedangkan untuk $m = n = 2$, daerah untuk status ‘siaga’ dibatasi oleh nilai PI antara 4 dan 8.
 - Untuk kasus kontingensi lepas cabang, daerah status ‘siaga’ diwakili oleh nilai PI antara 2.6 dan 5 untuk orde pangkat $m = n = 3$, dan nilai PI antara 2.2 dan 4.6 untuk $m = n = 4$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Albuyeh, F., A. Bose, B.Heath, *Reactive Power Considerations in Automatic Contingency Selection*, IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-101, Januari 1982
2. Alan, G. dan Liu W.H Joseph, *Computer Solution of Large Space Positive Designed Systems*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1981
3. Brown, Homer E., *Solution of Large Networks by Matrix Methods*, John Wiley & Sons Inc., 1975
4. Ejebe, G. C, dan B. F. Wollenberg, *Automatic Contingency Selection*, IEEE Trans. Power App. Systems, Vol. PAS-98, Jan/Feb 1979
5. Gonen, Turan, *Modern Power Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1988
6. Gonen, Turan, *Electric Power Transmission System Engineering, Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, 1988
7. Grainger, John. J dan W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, Mc Graw-Hill Inc., New York, 1994
8. Horak, J., dan D. J. Finley, *Load Shedding for Utility and Industrial Power System Reliability*, 53rd Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, May 5-7, 1999
9. Kundur, Prabha, *Power System Stability and Control*, Mc Graw-Hill Inc., 1994
10. Kusic, G. L., *Computer Aided Power System Analysis*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1986
11. Pai, M. A., *Computer Techniques and Power System Analysis*, Tata Mc Graw Hill, New Delhi, 1984
12. Sullivan, R. L., *Power System Planning*, Mc Graw-Hill, 1977
13. Wood, Allen J., dan B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons Inc., 1996

BIODATA

Riko Nofendra, MT, Lahir di Padang, 13 November 1976, Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2002 bidang Teknik Tenaga Listrik. Pendidikan S2 bidang Teknik Kendali dan Sistem diselesaikan di Institut Teknologi Bandung (ITB) tahun 2006. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005.