

# STUDI EFEKTIFITAS INDIKATOR KESTABILAN TEGANGAN PADA MODEL DINAMIS SISTEM TENAGA LISTRIK

Muhammad Nizam

Teknik Elektro, Universitas Negeri Surakarta

## ABSTRAK

*The paper presents the effectiveness of voltage stability indices for dynamic power system modelling study in providing information about the proximity of voltage collapse in power system. Four simple stability indices as Voltage Instability Predictor (VIP), Impedance Stability Index (ISI), Line Index (L index) and Voltage Collapse Prediction Index (VCPI) are compared using WSCC 9 bus test system. The comparison show the ISI and VCPI are much more reliable indicator, give the fast indication and fast time computation than L index for voltage collapse in dynamics voltage collapse prediction.*

**Keywords:** *Dynamics Voltage Collapse, Voltage Instability Predictor, Impedance Stability Index, Line Index, Voltage Collapse Prediction Index.*

## PENDAHULUAN

Pada beberapa dekade belakangan ini keperluan tenaga listrik telah mengalami permintaan yang cukup besar. Hal ini di karenakan perkembangan dunia industri yang begitu cepat. Besarnya permintaan beban tenaga listrik ini tidak dapat diimbangi dengan penyediaan sumber tenaga yang cukup. Akibatnya permintaan beban telah mencapai tahap kritis yakni telah mendekati ambang batas penyediaannya, yang mana keadaan ini sangat membimbangkan.

Dalam keadaan normal permasalahan kestabilan tegangan terjadi akibat pemakaian beban tenaga listrik yang cukup besar. Apabila keadaan ini ditambah dengan gangguan pada sistem tenaga listrik akan semakin memperlemah kestabilan tegangan dan ujung-ujungnya akan terjadi keruntuhan tegangan (Nizam dkk. 2005). Runtuhnya tegangan ini akan membawa situasi blackout atau kegagalan sistem tenaga secara keseluruhan. Selain beban yang besar penyebab terjadinya permasalahan ini adalah karena kurangnya daya reaktif yang dipasok oleh generator, karakteristik beban, karakteristik alat kompensasi daya reaktif dan

keberkesanan alat pengatur tegangan pada sistem tenaga misalnya ULTC (Kundur, 1994).

Untuk memperkirakan kestabilan dipakai banyak metode. Sebagian dari metode ini dipakai untuk analisis steady state dan sebagian lagi dipakai untuk menganalisis sistem dinamis. Sistem dinamis adalah sistem yang dipakai dengan waktu dimasukkan sebagai acuan. Analisis sistem dinamis ini perlu karena lebih mendekati keadaan riil yang dihadapi sehari-hari dibanding dengan analisis steady state. Beberapa indikator yang telah dipakai untuk analisis dinamis ini adalah Impedance Stability Index (ISI), Voltage Collapse Prediction Indicator (VCPI), L-Index dan Power Margin. Sistem yang dipakai sebagai indikator analisis sistem dinamis ini telah dikembangkan dan dipasangkan secara on line dengan sistem tenaga listrik. Penggunaan indikator ini dipakai untuk mempermudah pemantauan keadaan sistem yang selalu berubah.

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Untuk sistem pemodelan digunakan tiga mesin, 9-bus WSCC dengan perangkat lunak PSCAD/ETMDC. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja dari empat indikator tadi dari sisi keakuratan indikasi dan waktu komputasinya.

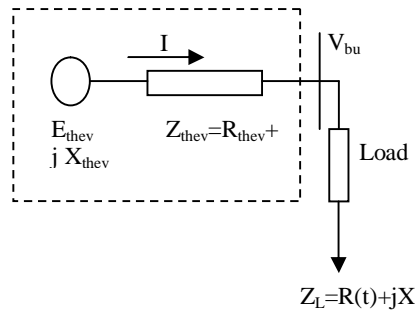
### **Indikator Kestabilan Tegangan**

Untuk memprediksi kestabilan dinamis tegangan beberapa indikator digunakan. Empat indikator akan dibandingkan dalam penelitian ini yakni Impedance Stability Index (ISI), Voltage Collapse Prediction Indicator (VCPI), L-Index dan Power Margin.

#### ***Impedance Stability Index (ISI)***

Impedance Stability Index (ISI) diturunkan dari konsep Voltage Instability Predictor (VIP) yang dikembangkan oleh ABB dan AEP. ISI ini dihitung dengan mencari jarak antara magnitude dari impedansi beban pada suatu bus dan impedansi thevenin. Menurut konsep ini suatu sistem yang kompleks dapat disederhanakan dengan sistem sederhana yang terdiri dari satu impedansi beban ( $Z_L$ ) dan tegangan pada bus beban ( $V_{bus}$ ) yang dipasang seri dengan impedansi thevenin ( $Z_{th}$ ) sebagai pengganti impedansi jaringan dan satu sumber tegangan sumber (tegangan thevenin/  $E_{th}$ ) sebagai pengganti tegangan jaringan, seperti yang terlihat pada Gambar 1.

ISI adalah indeks yang merepresentasikan perbedaan antara nilai impedansi thevenin,  $Z_{th}$  pada waktu tertentu dan impedansi dari beban yang merupakan perbandingan dari tegangan pada bus dan arus yang mengalir pada beban itu (Bergovic dkk. 2002 dan Julian dkk., 2000)



Gambar 1. Rangkaian Penyederhanaan

Dalam Gambar 1 terlihat bahwa ketidakstabilan tegangan akan terjadi pada sistem apabila impedansi  $Z_{thev}$  sama dengan nilai impedansi bus beban  $Z_L$  yang diberikan sebagai  $Z_{Lm} = \left| \frac{\bar{V}_{bus}}{\bar{I}} \right|$ . Ketidakstabilan bus beban dapat dianalisis dengan melihat index ISI ini yang diberikan oleh persamaan (1) dibawah ini,

$$ISI_m = \frac{Z_{thev}}{Z_{Lm}} \quad (1)$$

dimana,

$Z_{thev}$  adalah impedansi jaringan terhadap bus m

$Z_{Lm}$  adalah impedansi pada bus m

Nilai ISI berkisar antara 0 dan 1. Nilai 0 bermakna kestabilan tegangan terjadi pada sistim jaringan pada bus tersebut, sedangkan nilai 1 bermakna bus tersebut mengalami keruntuhan tegangan (voltage collapse). Proses menuju nilai ISI=1 ini akan dapat diamati sebagai proses kestabilan sistem tegangan pada suatu bus beban.

### **Voltage Collapse Prediction Indicator (VCPI)**

Perhitungan indeks VCPI memerlukan data mengenai informasi fasor tegangan bus partisipasi pada sistem jaringan dan matriks admitansi (Balamourgan, 2004). Penurunan rumusan ini secara ringkas diberikan pada persamaan (2)-(7). Untuk N-sistem bus, konjugate dari daya kompleks pada bus k diberikan pada persamaan (2),

$$S_k^* = \left[ \begin{array}{c} |V_k|^2 - (|V_k| \cos \delta_k - j|V_k| \sin \delta_k) \\ \left[ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N (|V_m| \cos \delta'_m + j|V_m| \sin \delta'_m) \right] \end{array} \right] Y_{kk} \quad (2)$$

$V_m'$  pada persamaan (2) diberikan sebagai

$$V_m' = \frac{Y_{km}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N Y_{kj}} V_m = |V_m'| \delta_m' \quad (3)$$

dimana :

$S_k$  adalah daya kompleks pada bus k

$V_k$  adalah fasor tegangan pada bus k

$V_m$  adalah fasor tegangan pada bus m

$\delta_k$  adalah sudut tegangan pada bus k

$Y_{km}$  adalah admitansi antara bus k dan bus m

$Y_{kj}$  adalah admitansi antara bus k dan bus j

Bus k adalah bus yang dimonitor

Bus m adalah bus selain dari bus k

Pada sisi sebelah kanan persamaan (2) adalah bilangan kompleks yang dapat dibentuk menjadi a-jb. Sehingga persamaan (2) dapat dijadikan menjadi persamaan (4) dan (5) dengan dua variabel yang tidak diketahui

$$f_1(|V_k|, \delta) = |V_k|^2 - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N |V_m'| |V_k| \cos \delta \quad (4)$$

$$f_2(|V_k|, \delta) = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N |V_m'| |V_k| \sin \delta \quad (5)$$

Persamaan (4) dan (5) dapat diselesaikan dengan mencari dua variabel yang tidak diketahui. Dengan teknik Newton-Raphson, matriks turunan parsialnya dapat dicari. Runtuh tegangan (voltage collapse) pada suatu bus terjadi pada saat determinan dari matriks sama dengan nol pada saat runtuh tegangan terjadi. Perhitungan pada keadaan ini menghasilkan hasil seperti pada persamaan (6)

$$\frac{|V_k| \cos \delta}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N |V_m'|} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

Dengan memanipulasi persamaan (6) maka VCPI pada bus k dapat dihitung seperti yang diberikan pada persamaan (7)

$$VCPI_k = \left| 1 - \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m'}{V_k} \right| \quad (7)$$

Nilai VCPI berkisar antara 0 dan 1. Nilai 0 bermakna kestabilan tegangan terjadi pada sistim jaringan pada bus tersebut, sedangkan nilai 1 bermakna tegangan pada bus tersebut mengalami keruntuhan (*voltage collapse*).

### **L-Index**

L-indeks diperkenalkan oleh Kessel dan Glavitch , dimana indeks ini di turunkan dari sistim desherhana dua bus yang dikembangkan untuk mengeneralisir pada sistim sistem yang mempunyai banyak bus. Index ini sederhana untuk mengitungnya sebab hanya menggunakan informasi yang diperoleh dari bus beban pada aliran beban biasa. Perhitungan L-indeks untuk bus j diberikan pada persamaan (8),

$$L_j = \left| \frac{S_j^+}{(Y_{jj}^+ * V_j^2)} \right| \quad (8)$$

dimana,

$S_j^+$  adalah transformasi dari kompleks daya yang diinjeksiikan

$Y_{jj}^+$  adalah transformasi dari admitansi yang diberikan oleh persamaan  $Y_{jj}^+ = 1/Z_{jj}$

$V_j$  adalah magnitude tegangan pada bus j

Transformasi daya  $S_j^+$  mengandungi dua bagian yakni,

$$S_j^+ = S_j + S_j^{cor} \quad (9)$$

dan untuk  $S_j^{cor}$  diberikan sebagai,

$$S_j^{cor} = \left[ \sum_{i \in \alpha_L} \frac{Z_{ji}^*}{Z_{jj}^*} \cdot \frac{S_i}{V_i} \right] V_j \quad (10)$$

Dimana,  $Z_{ji}$ ,  $Z_{jj}$  adalah off diagonal dan elemen-elemen diagonal dari matriks impedansi.  $\alpha L$  adalah set bus-bus beban dan  $V$  adalah tegangan (kompleks).

$V_j$  dipengaruhi oleh daya  $S_j$  dan persamaan daya  $S_j^{cor}$ , yang mana ini adalah representasi dari beban-beban lain dalam sistem tersebut. Nilai dari  $L$  indeks bervariasi berkisar antara 0 (stabil) dan 1 (kondisi tegangan runtuh, voltage collapse). Untuk menjaga agar sistem tetap berada pada situasi stabil maka kondisi  $L_j \leq 1$  harus dipertahankan pada setiap bus-  $j$  (Huang 2002).

### **Power Margin**

Indeks Power margin digunakan untuk menelusuri sejauh mana kedekatan suatu keadaan beban terhadap tegangan runtuhnya berdasarkan pada keadaan daya semunya. Indeks ini diturunkan dari konsep VIP seperti halnya ISI. Dimana penelusuran kestabilan tegangan ditunjukkan dengan jarak antara dua kurva tegangan atau antara dua kurva impedansi.

Power margin didefinisikan sebagai perbedaan daya antara maksimum daya yang dapat dihantarkan dan daya yang di konsumsi beban, dengan menggunakan dengan menggunakan perkuran linear (Julian dkk, 2000). Power margin dapat juga didefinisikan sebagai kelebihan MVA yang dapat di kirimkan ke beban sebelum sistem keruntuhan tegangan terjadi (Bergovic dkk, 2002). Secara matematis power margin diberikan pada persamaan(11),

$$\Delta S_m = Z_m I_m^2 - Z_{thev} I_m^2 \quad (11)$$

dimana,

$\Delta S_m$  adalah *power margin* pada bus  $m$

$Z_m$  adalah impedansi beban pada bus  $m$

$Z_{thev}$  adalah impedansi jaringan ekuivalen

$I_m$  adalah arus yang terukur pada bus  $m$

Dari persamaan (11), bila power margin mendekati nol, ini bermakna tidak ada daya yang dapat ditambahkan dan tegangan runtuh akan terjadi.

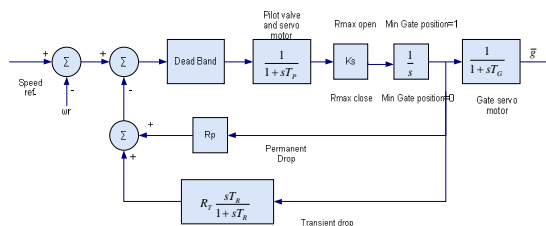
### **Simulasi Dinamis Pengujian**

Model sistem tenaga, untuk pengujian dalam studi ini dan procedure untuk simulasi dinamis untuk pengujian kestabilan tegangan diuraikan sebagai berikut.

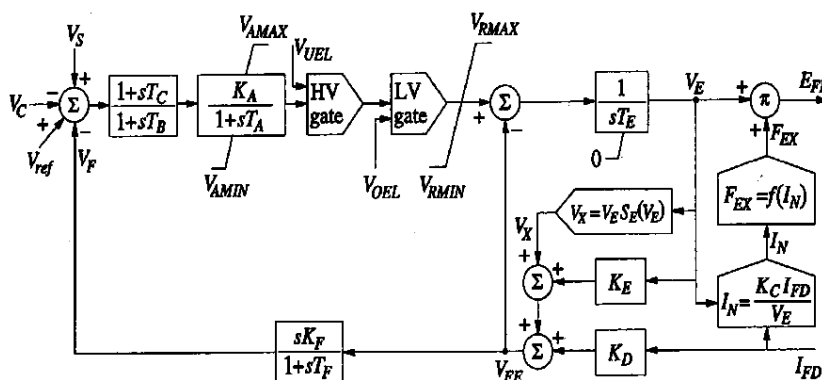
#### **Model Sistem Tenaga**

Model governor generator dalam pengujian ini menggunakan model governor mechanical-hydraulic untuk turbin hidrolik (Kundur, 1994) sebagaimana nampak pada gambar 2 dibawah dan model sistem eksitasi menggunakan model

IEEE tipe AC1A sebagaimana nampak pada gambar 3. Parameter sistem governor dan eksitasi yang digunakan dalam simulasi diberikan pada Tabel 1 dan 2 (Kundur, 1994).



Gambar 2. model governor untuk turbin hidrolik



Gambar 3. Sistem Eksitasi model IEEE AC1A

Tabel 1 Parameter Governor

Q	T <sub>R</sub>	R <sub>T</sub>	T <sub>G</sub>	T <sub>P</sub>	R <sub>P</sub>
5	5 sec	0.4 pu	0.2 sec	0.05 sec	0.04 pu

Tabel 2 Parameter sistem eksitasi – Tipe AC1A

K <sub>F</sub>	T <sub>F</sub>	K <sub>A</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	V R <sub>Max</sub>	V R <sub>MIN</sub>
0.03 pu	1.0 sec	400 pu	0.02 sec	0 sec	0 sec	7.3 pu	-6.6 pu

Q = servo gain

K<sub>F</sub> = Rate feedback Gain

T<sub>C</sub> = Lead Time constant

$T_R$  = dashpot reset time  
 $T_F$  = Rate feedback constant  
 $VR_{MAX}$  = max regulator output  
 $R_T$  = Temporary drop  
 $K_A$  = Regulator gain  
 $VR_{MIN}$  = min regulator output  
 $T_G$  = Main servo time constant  
 $T_A$  = Regulator Time constant  
 $R_P$  = Permanent drop

Generator 1, generator 2 dan generator 3 mempunyai rating masing-masing 250 MVA, 300 MVA dan 150 MVA. Konstanta inersia (H)

$TW$  = Water Starting Time

$TB$  = Lag Time constant

Model beban menggunakan beban komposit yang diberikan oleh persamaan (12) and (13),

$$P = P_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^{np} \quad (12)$$

$$Q = Q_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^{nq} \quad (13)$$

Dimana  $P_o$  dan  $Q_o$  adalah daya aktif dan reaktif beban pada kondisi inisial,  $np$  dan  $nq$  adalah parameter beban yang merupakan fungsi dari  $dP/dV$  or  $dQ/dV$ . Untuk kasus dimana  $np$  dan  $nq$  sama dengan 0, 1, 2, maka model beban akan mewakili, konstan daya, konstan arus dan konstan impedansi beban. Paramater model beban di sajikan dalam tabel 3.

Tabel 3. Parameter Model Beban (Navaro,2002)

<b>Load Component</b>	<b>np</b>	<b>nq</b>
Air Conditioner	0.5	2.5
Fluorescent Lighting	1.00	3.00
Pumps, fan	0.08	1.6
Large Industrial Motor	0.05	0.5
Small Industrial Motor	0.1	0.6
Resistance Space heater	2.0	0.0



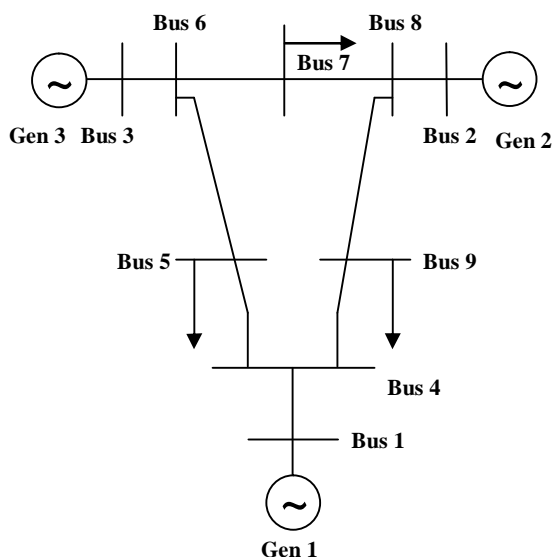
## Sistem Pengujian

Sistim pengujian 9 bus digunakan dalam simulasi dinamis disajikan dalam Gambar 4. Parameter sistem jaringan di tabulasikan pada Tabel 4. Sistem terdiri dari tiga generator yang terhubung pada buis 1, 2 dan 3.

Tabel 4 Parameter Jaringan

Line	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Susceptance (pu)	MVA rating
1-4	0.0000	0.0576	0.0000	250
4-5	0.0170	0.0920	0.1580	250
5-6	0.0390	0.1700	0.3580	150
3-6	0.0000	0.0586	0.0000	300
6-7	0.0119	0.1008	0.2090	150
7-8	0.0085	0.0720	0.1490	250
8-2	0.0000	0.0625	0.0000	250
8-9	0.0320	0.1610	0.3060	250
9-4	0.0100	0.0850	0.1760	250

masing-masing 23.64 MW-s/MVA, 6.4 MW-s/MVA and 3.01 MW-s/MVA.



Gambar 4. Sistem Pengujian WSCC 9 bus

Beban statik telah ditentukan untuk contingency satu dan dua dalam bus sistem pada bus 7 dan bus 9 yakni  $100 + j 35$  MVA dan  $125 + j 50$  MVA. Pada contingency satu, beban composite terhubung pada bus 5 dari beban awal ( $0.558 + j0.441$ ) pada basis daya 100 MVA. Untuk simulasi pada contingency kedua, beban

terhubung pada bus 5 diganti menjadi beban murni daya nyata, beban konstan impedansi dengan beban awal 0.7 pu,. Contingency ketiga beban komposit dihubungkan pada bus 5 dengan beban awal  $(0.558 + j0.441)$  pu dan beban pada bus 7 berubah menjadi konstan impedansi. Dengan beban awal 0.75 pu.

### **Prosedur untuk Simulasi Dinamis**

Simulasi dinamik untuk mengetahui unjuk kerja pada masing-masing indeks kestabilan tegangan dilakukan dengan menggunakan program PSCAD/EMTDC. Beban static contingency pertama dalam sistem yang terhubung pada bus 7 dan bus 9 masing-masing  $100 + j 35$  MVA and  $125 + j 50$  MVA. Beban komposit terhubung pada bus 5 dinaikkan dari beban awal  $(0.558 + j0.441)$  pu penambahan pembebanan dilakukan sebesar  $(0.112 + j0.088)$  pu per detik dengan waktu interval dari  $t=10$  detik sampai 80 detik. Simulation pada contingency kedua beban terhubung pada bus 5 diubah menjadi beban dengan impedansi konstan. Beban awal 0.7 pu, penambahan pembebanan 0.138 pu per detik pada interval waktu  $t = 10$  detik sampai 80 detik. Contingency ketiga dilakukan dengan menghubungkan bus 5 dengan beban komposit dari beban awal  $(0.558 + j0.441)$  pu dengan penambahan pembebanan  $(0.112 + j0.088)$  pu per detik dari interval waktu  $t=10$  detik sampai 80 detik dan beban pada bus 7 diubah menjadi beban dengan impedansi konstan. Beban awal 0.75 pu, dengan penambahan pembebanan 0.15 pu per detik pada interval waktu  $t = 10$  detik sampai 35 detik dan beban statik terhubung pada bus 9 adalah  $125 + j 50$  MVA.

Prosedure dalam simulasi ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Masukkan data kedalam beban, generator dan data jaringan pada sistem pengujian pada PSCAD/EMTDC.
2. Buat hubung pendek pada tiap-tiap bus yang dimonitor untuk mengitung arus Norton dan untai terbuka untuk mengetahui tegangan Thevenin, E. Dari I dan E, Impedansi Thevenin dapat dihitung. Impedansi Thevenin digunakan untuk menghitung power margin dan ISI.
3. Jalankan simulasi masing masing contingency pada waktu interval dari  $t = 5$  detik sampai 80 detik.
4. Pada setiap langkah waktu 1 detik, ukur kembali tegangan, arus, daya nyata dan daya reaktif pada bus yang dimoonitor.
5. Gunkan data ini dari langkah (iv), dan hitung masing-masing indeks seperti, power margin, ISI, VCPI dan L indeks untuk setiap 1 detik.
6. Gambar indeks vs waktu.
7. Kembali ke langkah (3) untuk contingency yang lain.

## ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui unjuk kerja dan efektifitas dari empat metode yang digunakan untuk memperkirakan kestabilan tegangan pada suatu sistem tenaga dengan menggunakan sistem dinamis. Hasil pengujian ini dapat disajikan sebagai berikut.

### Hasil untuk *contingency* satu, penambahan beban pada bus 5

Gambar 5 (a)-(d) menunjukkan plot dari ISI, L index, VCPI dan power margin terhadap waktu pada kasus *contingency* pertama, gambar 6 a), b), c) and d) menunjukkan plot pada kasus *contingency* kedua dan gambar 7 a), b), c) and d) untuk kasus *contingency* ketiga. Untuk ketiga-tiga kasus ini, indikator digambarkan untuk mengetahui indek pada bus yang dimonitor yakitu bus 4, bus 5, bus6, bus 7 and bus 9. Tabel 5 memperlihatkan pengaruh *contingency* pertama terhadap kesemua index pada bus 5 secara numeris.

Gambar 5a) dan 5c) memperlihatkan pada bus 5 terjadi peningkatan indeks kestabilan sampai dengan keruntuhan tegangan yang terjadi pada saat  $t = 40.5$  detik dimana indeks ISI dan indeks VCPI mencapai nilai tertinggi pada waktu itu magnitud tegangan yang dicapai pada saat keruntuhan tegangan adalah 0.64 p.u. Bus yang dekat dengan bus 5 yakni bus 4 dan bus 6 juga mengindikasikan keruntuhan tegangan. Hal ini ditunjukkan dengan indikasi indeks yang mendekati satu. Bus yang terletak jauh dari bus 5 pengaryhnya tidak begitu besar. Pada bus 7 dan bus 9, terjadi pula kenaikan indeks kestabilan tegangan namun tidak sebesar pada tiga bus yang terdahulu.

Sementara itu, gambar 5b) menunjukkan bahwa keruntuhan tegangan terjadi pada waktu  $t = 50.5$  detik dimana ditunjukkan L index mencapai nilai satu, ini terjadi pada waktu magnitud tegangan mencapai 0.56 p.u. Gambar 5d) mengindikasikan keruntuhan tegangan dicapai pada bus 5, 4 dan 6.

Keruntuhan tegangan terjadi pada waktu sekitar  $t = 40, 51$  dan 60 detik, untuk bus 5, 4 dan 6. Waktu yang ditempuh untuk mencapai keruntuhan tegangan L index lebih lama dibandingkan dengan indikasi yang ditunjukkan pada VCPI dan ISI. Gambar 5d) memebri gambaran hubungan antara power margin dan magnitud tegangan pada semua bus yang di monitor.

Magnitud tegangan pada bus 5 akan menurun sampai mencapai nilai 0.645 p.u., pada waktu itu power margin mencapai nol. Ini bermakna keruntuhan tegangan terjadi sebab tidak ada lagi extra MVA yang dapat dihantar ke beban atau maksimum penghantaran daya telah dicapai[2].

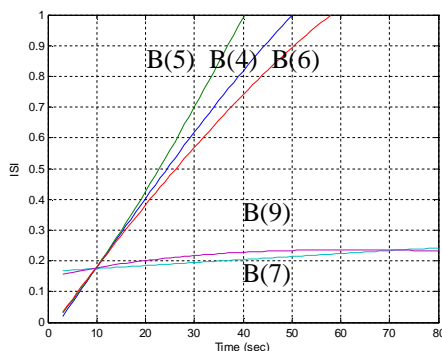
Tabel 5 Pengaruh *contingency* pertama di bus 5

Time	V5	Power MVA (pu)	ISI	L-index	VCPI	PM
3	0.9958	0.8977	0.0986	0.1555	0.0986	0.4672
10	0.9475	1.0088	0.1224	0.1889	0.1224	0.5112
15	0.91	1.7919	0.2357	0.3304	0.2357	0.7907
20	0.8566	2.6566	0.3943	0.4899	0.3943	0.929
25	0.7954	3.2057	0.5519	0.6159	0.5519	0.8294
30	0.7358	3.5242	0.709	0.7185	0.709	0.5922
35	0.6863	3.671	0.849	0.7953	0.849	0.32
38	0.6574	3.7539	0.9461	0.8421	0.9461	0.1168
39	0.6507	3.7425	0.9628	0.8496	0.9628	0.0805
40	0.6452	3.7273	0.9754	0.8552	0.9754	0.053
41	0.6342	3.7802	1.0238	0.8762	1.0238	-0.052

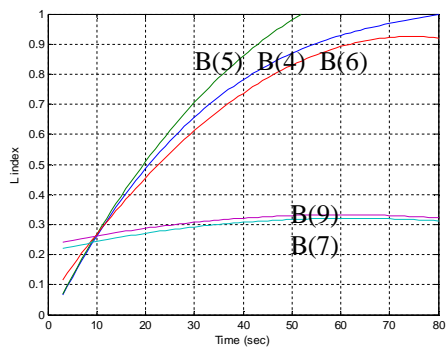
**Hasil *contingency* kedua, Penambahan beban nyata(real power) pada bus 5**

Tabel 6 menunjukkan hasil seluruh indeks pada bus 5 sebagai pengaruh dari *contingency* kedua. Dari tabel 6 ini Keruntuhan tegangan terjadi pada waktu ISI dan VCPI mengindikasikan mencapai satu pada bus 6, pada waktu  $t = 46.5$  detik dimana tegangan mencapai  $0.71pu$ .

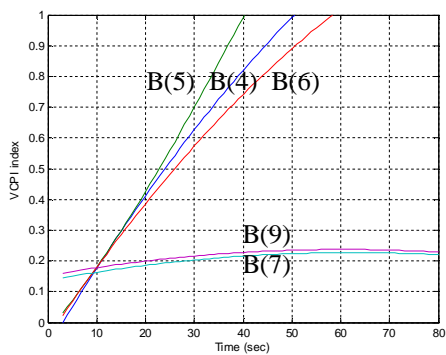
Gambar 6a) and 6c) memperlihatkan pencapaian keruntuhan tegangan yang hampir sama waktunya antara bus 6 dan bus 5. Bus 4 juga mengindikasikan terjadi keruntuhan tegangan pada  $t = 50.5$  detik. Meskipun demikian pada gambar 6b) menunjukkan bahwa L index sedikit lebih lambat dalam indikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keruntuhan tegangan pada indeks L terjadi pada saat  $t = 61$  detik bila mana indek mencapai satu dan pada saat magnitude tegangan mencapai  $0.75 p.u$



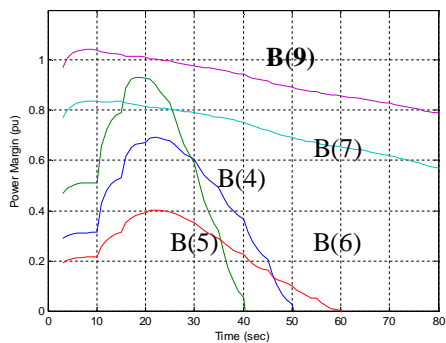
(a) ISI vs Time



(b) L Index vs Time



(c) VCPI vs Time



(d) Power Margin vs Time

Gambar 5 (a)-(d) Indikasi terhadap waktu untuk kasus penambahan beban static pada bus 5

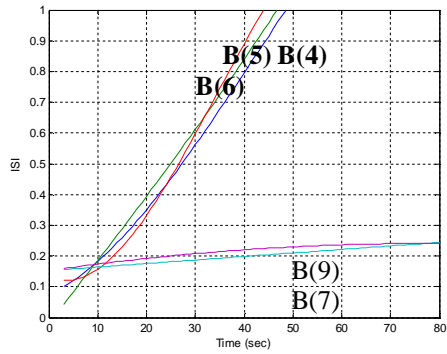
Pada kasus ini tiga bus juga mengalami keruntuhan tegangan hamper sama waktunya dengan contingency pertama. Indikasi waktu keruntuhan tegangan pada L index lebih lama dibandingkan dengan VCPI dan ISI. Gambar 6d) mengilustrasikan hubungan antara power margin dan waktu pada monitoring bus. Pada saat magnitud tegangan berkurang sampai dengan 0.71 p.u. power margin pada titik tersebut mencapai nilai nol, hal ini dikatakan keruntuhan tegangan terjadi pada titik dan waktu tersebut. Hal ini di karenakan tidak ada lagi kelebihan MVA yang dapat dihantarkan ke beban. Titik keruntuhan tegangan terjadi pada saat  $t = 46.5$  detik. Bus yang lain yaitu bus 4 dan 6 mengindikasikan juga terjadi keruntuhan tegangan setelah bus 5. Dari kedua contingency ini terlihat bahwa ISI dan VCPI memberikan indikasi yang lebih cepat dibandingkan dengan L index.

Tabel 6. Pengaruh contingency kedua pada bus 5

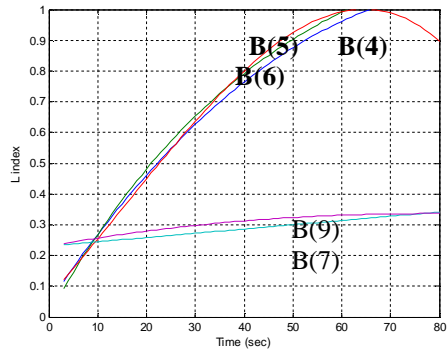
Time	V5	Power MW (pu)	ISI	L-index	VCPI	PM
3	1.0096	0.9549	0.1035	0.1624	0.1035	0.4943
10	0.9739	1.0924	0.1272	0.1955	0.1272	0.5505
15	0.953	1.9943	0.2425	0.3381	0.2425	0.8722
20	0.9294	2.8583	0.3654	0.4635	0.3654	1.0472
25	0.9029	3.6148	0.4897	0.5694	0.4897	1.065
30	0.8711	4.1989	0.6112	0.657	0.6112	0.9426
35	0.8315	4.5665	0.7295	0.7306	0.7295	0.7132
40	0.7858	4.722	0.8446	0.793	0.8446	0.4238
45	0.7354	4.6917	0.9582	0.8475	0.9582	0.1134
46	0.7226	4.7141	0.9972	0.8648	0.9972	0.00
47	0.7103	4.6779	1.00	0.8763	1.00	0.00

Tabel 7 Waktu keruntuhan tegangan masing-masing bus dengan indikator ISI

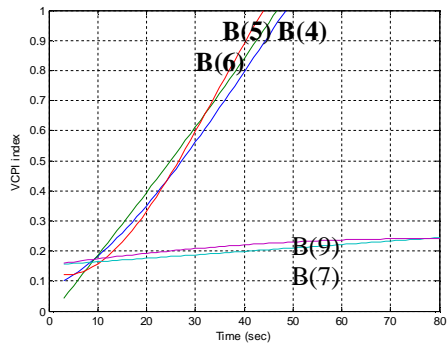
Time	V(4)	ISI 4	V (5)	ISI 5	V (6)	ISI 6	V (7)	ISI 7	V (9)	ISI 9
3	1.0136	0.1015	1.0096	0.1035	1.0166	0.1093	1.0025	0.1354	0.9957	0.1453
20	0.9564	0.3681	0.9294	0.3654	0.9655	0.3339	0.9365	0.1724	0.9186	0.1901
25	0.9437	0.4737	0.9029	0.4897	0.9502	0.4613	0.9241	0.1765	0.9044	0.1951
30	0.9291	0.5675	0.8711	0.6112	0.9247	0.5934	0.9058	0.1838	0.8873	0.2033
35	0.9117	0.6539	0.8315	0.7295	0.8862	0.7266	0.8796	0.1955	0.8664	0.2127
40	0.8915	0.7388	0.7858	0.8446	0.8354	0.8574	0.8461	0.2122	0.8423	0.2245
43	0.8771	0.8103	0.7529	0.9339	0.7977	0.9478	0.8221	0.2171	0.8262	0.2311
44	0.8733	0.818	0.7439	0.948	0.7853	0.9757	0.8146	0.2178	0.8215	0.2322
45	0.8697	0.822	0.7354	0.9582	0.773	1.00	0.8073	0.2182	0.8169	0.233
46	0.8641	0.8561	0.7226	0.9972	0.7578	1.00	0.7982	0.2181	0.8115	0.2333
47	0.8589	0.8799	0.7103	1.00	0.741	1.00	0.7883	0.2178	0.806	0.2335
50	0.836	0.9727	0.6597	1.00	0.6463	1.00	0.732	0.2121	0.7784	0.2312
51	0.8242	1.00	0.6368	1.00	0.6068	1.00	0.7048	0.2098	0.7637	0.2297



(a) ISI vs Time

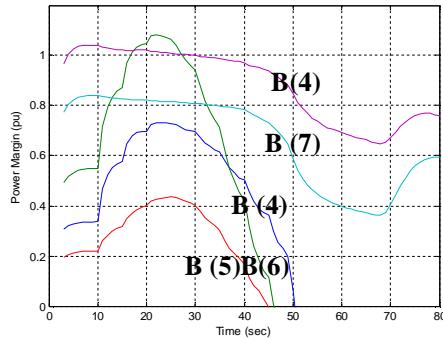


(b) L Index vs Time



(c) VCPI vs Time





(d) Power Margin vs Time

Gambar 6. (a)-(d) Indikasi kestabilan tegangan terhadap waktu untuk kasus penambahan real power pada 5

### Hasil contingency ketiga, penambahan beban pada bus 5 dan bus 7

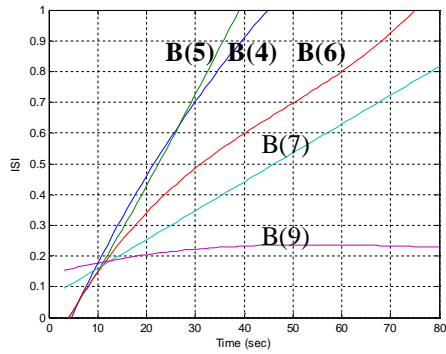
Gambar 7a) dan 7c) memperlihatkan kecenderungan indikasi yang hampir sama sama dengan kedua contingency yang telah dipaparkan sebelumnya. Indikasi ISI and VCPI memberikan hasil yang lebih cepat disbanding L index. Bus 5 mencapai titik keruntuhan tegangan pada waktu  $t = 40.5$  detik, ISI dan VCPI menunjukkan hasil yang sama. Pada titik itu magnitude tegangan yang dicapai adalah 0.61 p.u, (lihat tabel 8). Indikasi keruntuhan tegangan juga terjadi pada bus 4 dan 6. Dimana keruntuhan tegangan pada bus 6 terlihat lebih cepat dibandingkan dengan contingency pertama.

Tabel 8. Pengaruh contingency ketiga pada bus 5

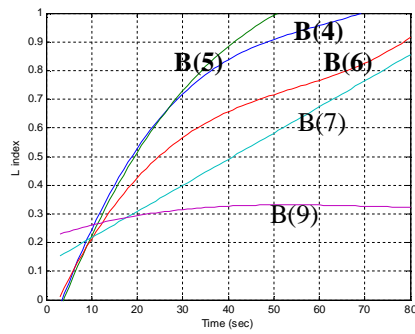
Time	V5	Power MVA (pu)	ISI	L-index	VCPI	PM
3	1.0208	0	0	0	0	0
10	0.9629	0.9653	0.1163	0.1804	0.1163	0.4925
15	0.9141	1.8094	0.2418	0.3373	0.2418	0.792
20	0.8565	2.6795	0.4079	0.5018	0.4079	0.916
25	0.7937	3.241	0.5745	0.632	0.5745	0.7962
30	0.7308	3.5262	0.7371	0.735	0.7371	0.5352
35	0.6721	3.5372	0.8744	0.808	0.8744	0.2564
40	0.6211	3.4361	0.9944	0.8636	0.9944	0.00
41	0.6068	3.424	1.00	0.8823	1.00	0.00

Meskipun demikian, Gambar 7b) juga menunjukkan pada L index keruntuhan tegangan terjadi lebih lambat dibanding dengan kedua indikator ISI dan VCPI. Keruntuhan tegangan pada bus 5 terjadi pada saat  $t = 52$  detik dengan magnitud tegangan 0.51 p.u. Dalam gambar 7 (a)-(d) kecenderungannya ada empat bus yang mengalami keruntuhan tegangan yakni bus 4, 5, 6 dan 7. Hal ini ditunjukkan bahwa pada ke empat bus mempunyai indek kestabilan tegangan yang naik mendekati satu, dimana maksimum daya boleh di hantarkan ke beban, sebelum titik keruntuhan tegangan di capai.

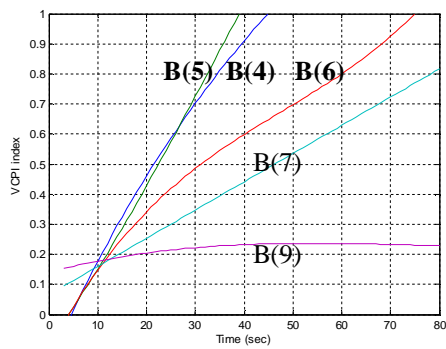
Untuk waktu komputasi, perhitungannya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak matlab untuk masing-masing indeks. Waktu yang dapat dicapai dalam simulasi ini pada ISI, VCPI dan Power margin adalah sekitar 0.0469 detik dengan waktu yang dicapai oleh L index pada simulasi ini adalah 0.0625 detik. Indikasi ketiga indeks (ISI, VCPI dan Power Margin) lebih cepat dibanding dengan L index.



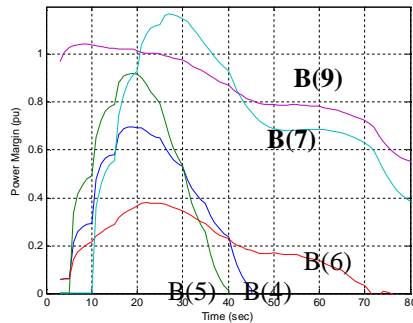
(a) ISI vs Waktu



(b) L Index vs Waktu



(c) VCPI vs Waktu



(d) Power Margin vs Waktu

Gambar 7. (a)-(d) Indikasi vs waktu untuk kasus penambahan beban static load pada bus 5 dan real power pada bus 7

Ketiga contingency juga menggambarkan bahwa magnitude tegangan akan menurun sebagai fungsi dari penambahan pembebanan setiap unit waktu. Pada simulasi ini juga terlihat bahwa semakin besar penurunan tegangan pada selang waktu tertentu mengindikasikan lebih cepat waktu keruntuhan tegangannya. Ini terlihat dari ketiga contingency diatas.

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini empat indikator kestabilan tegangan yang dibandingkan untuk memberikan perkiraan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik pada sistim dinamik. Sistem diverifikasi dengan menggunakan pengujian 9 bus WSCC. Dalam pengujian ini lima bus diamati. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ISI dan VCPI memberikan prediksi yang lebih cepat dan lebih baik dibandingkan dengan L index. Indikator ISI dan VCPI sangat sensitif dalam mendeteksi ketidakstabilan tegangan dan penentuan titik keruntuhan tegangan disbanding dengan L index. Power margin (PM) memeberikan informasi lebih kearah berapa besar sistem masih memiliki kemampuan untuk menghantar daya ke bus beban. Indikator PM sangat baik untuk kegunaan pengaturan sistem terutama untuk Load Shedding. Perhitungan waktu komputasi menunjukkan ISI, VCPI dan Power Margin also lebih cepat dibandingkan dengan L index. Penelitian yang akan datang adalah akan dikembangkan untuk menemukan metode baru untuk indikasi kestabilan tegangan dan pengaturan pencegahan yang akan dilakukan untuk mencegah agar keruntuhan tegangan ini tidak terjadi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balamourougan, V., Sidhu T.S., Sachdev, M.S. 2004. Technique for online prediction of voltage collapse. IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., 151(4): 453-460
- Bergovic M., Milosevic M., Novosel D. 2002. A Novel Method for Voltage Instability Protection. Proceeding of the 35th Hawaii International Conference on system science. (HICSS'02). 2.
- Huang G.M. and Nair KLC, 2001. Detection of Dynamic Voltage Collapse. Power System Engineering Research Centre. [www.pserc.wisc.edu/ecow/get/publicatio/2002public/dynamic\\_summer.pdf](http://www.pserc.wisc.edu/ecow/get/publicatio/2002public/dynamic_summer.pdf) (5 January 2005)
- Julian DE, Schultz, R.P., Vu K.T., Quantance, W.H., Bhatt, N.B., and Novosel,D., 2000. Quantifying proximity to voltage collapse using the voltage Instability Predictor (VIP). Proc. IEEE PES Summer Meeting, Seattle WA, 2 : 931-936
- Kundhur, P. 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hills, Inc, New York.
- Navaro, I.N. 2002. Dynamic Load Models For Power System, Thesis, Lund University. pp.38-42
- Nizam. M, Mohamed. A, Zamri C.W. 2005. Dynamic Voltage Collapse Prediction and control in Power System, Prosiding SPS 2005, Pusat Penerbitan dan Teknologi Pendidikan UKM, Malaysia, pp.71-76