

## Kesan Penjana Fotovolta Tersambung-Grid terhadap Kestabilan Voltan Dinamik dalam Sistem Kuasa

(Effect of Grid-Connected Photovoltaic Generator on Dynamic Voltage Stability in Power System)

Zetty Adibah Kamaruzzaman

Centre for Integrated Systems Engineering and Advanced Technologies (INTEGRA)  
Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia  
Azah Mohamed\* & Nor Azwan Mohamed Kamari

Centre for Integrated Systems Engineering and Advanced Technologies (INTEGRA)  
Programme for Electrical, Electronic and System Engineering  
Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia

### ABSTRAK

Penyepaduan penjana fotovolta (FV) tersambung-grid ke dalam sistem kuasa memberi kesan teknikal kerana reka bentuk rangkaian asalnya tidak mengambil kira penyepaduan penjanaan teragih. Pertumbuhan pesat pemasangan dan penembusan tinggi penjana fotovolta tersambung-grid boleh menimbulkan beberapa isu teknikal seperti kualiti kuasa dan kesan ke atas kestabilan voltan sistem kuasa. Kajian ini memberi tumpuan kepada analisis kestabilan voltan dinamik, serta menentukan parameter dinamik penjana FV yang memberi kesan terhadap kestabilan voltan dinamik. Model sistem yang dibangunkan untuk analisis kestabilan voltan dinamik menimbang model dinamik penjana FV dan beban dinamik. Simulasi domain-masa kestabilan voltan dinamik mengambil kira faktor seperti tenggelam-timbul sinaran suria, beban dinamik seperti motor aruhan dan putusan talian. Simulasi dilakukan pada tahap maksimum penembusan FV; 2% bagi sistem penghantaran IEEE 118 bas dan 60% bagi sistem agihan jejari IEEE 69 bas. Keputusan mendapati bahawa tenggelam-timbul sinaran suria yang berpunca dari kejadian lindungan awan boleh memberi kesan terhadap kestabilan voltan dalam sistem kuasa. Kejatuhan voltan secara mendadak menyebabkan ketakstabilan voltan dinamik yang mana bus mengalami kejatuhan voltan melebihi 6% sisihan voltan yang dibenarkan. Gangguan dinamik seperti permulaan motor aruhan turut menjejaskan kestabilan voltan. Selain itu, didapati berlakunya kepulauan yang disebabkan oleh putusan talian di talian tersambung pada bus penjana FV. Justeru, kehadiran sistem penjana FV tersambung grid dan motor aruhan tidak dapat membantu mengekalkan keseimbangan voltan bus yang akhirnya boleh membawa kepada keruntuhan voltan.

Kata kunci: Pstabilan voltan dinamik; sistem fotovolta tersambung-grid; sistem dinamik fotovolta

### ABSTRACT

The integration of grid-connected photovoltaic (PV) generation into a power system causes certain technical effects because the network design initially does not consider the integration of distributed generation. The rapid growth of PV module installations and high penetration of PV generation can cause many technical issues such as poor power quality and can impact on power system voltage stability. This study focuses on dynamic voltage stability analysis as well as determining the dynamic PV system parameters that affect dynamic voltage stability. The system models developed for dynamic voltage stability analysis consider the dynamic PV generator model and dynamic load. Time-domain dynamic voltage stability simulations consider factors such as intermittent solar radiation, line outage and dynamic load such as the induction motor. Simulations were performed at the maximum level of PV penetration; 2% for the IEEE 118 bus transmission system and 60% for the IEEE 69 bus radial distribution system. The results show that intermittent solar radiations due to cloud cover have an impact on voltage stability in the power system. The sudden drop in voltage causes dynamic voltage instability in which the bus voltage drops more than 6% of the allowable voltage deviation. Dynamic disturbances such as starting of the induction motor also affect voltage stability. Notwithstanding, islands are formed due to line outage at the line connected to the PV generator bus. Hence, the presence of the grid-connected PV generator and induction motor cannot help to maintain balancing of the bus voltage which can ultimately lead to voltage collapse.

Keywords: Dynamic voltage stability; grid-connected photovoltaic systems; dynamic photovoltaic model

### PENGENALAN

Kapasiti elektrik global yang terhasil dari sistem fotovolta (FV) telah meningkat dengan pesat sejak sedekad yang lalu.

Faktor utama perkembangan ini adalah kerana penghasilan tenaga elektrik dari sumber boleh baharu menjadi pilihan terbaik untuk memenuhi peningkatan permintaan beban. Pada masa kini, kos pemasangan loji fotovolta tersambung-grid

(FVTG) berskala besar telah menurun dan lebih rendah dari kos pemasangan loji kuasa nuklear (Olken 2013). Atas sebab ini, pemasangan sistem FV bersaiz sepuluh hingga ratusan MW yang disambung pada sistem penghantaran dijangka meningkat. Walaupun solar FV berkembang dengan pesat dan memberi manfaat kepada ekonomi negara dan alam sekitar, beberapa isu teknikal berkaitan operasi sistem kuasa tetap muncul. Permasalahan ini berpunca dari ketidakpastian dalam sinaran suria dan juga kuasa keluaran dari sistem FV yang telah menimbulkan pelbagai isu teknikal seperti ketidakseimbangan voltan, aliran kuasa terbalik dan voltan lampau. Masalah semakin ketara apabila sistem FVTG berada pada tahap penembusan tinggi.

Kajian penyelidikan oleh Western Electricity Coordinating Council, Amerika Syarikat menunjukkan bagaimana sistem FV berskala besar boleh memberi kesan terhadap kestabilan voltan statik dan dinamik dalam sistem kuasa (Eftekharnejad et al. 2013). Parameter sistem FV seperti tenggelam-timbul sinaran suria yang berpunca daripada perubahan cuaca seperti pergerakan awan dan hujan boleh membawa kepada masalah ketakstabilan voltan dinamik. Keadaan menjadi semakin buruk pada tahap tinggi penembusan FV dan permintaan beban tinggi. Sebagai contoh, cuaca bermusim di Malaysia membawa kepada pergerakan awan secara besar-besaran dan keadaan ini menjadikan Malaysia negara yang paling kurang menerima langit terang sepanjang tahun berbanding negara lain (Hahn et al. 2007). Dalam keadaan langit berawan, sinaran suria adalah tidak menumpu dan boleh menyebabkan turun naik voltan dan frekuensi sistem FV dengan ketara (Marcos et al. 2012). Memandangkan kejadian pergerakan awan ini berlaku dalam beberapa milisaat, susutan voltan di beberapa buah bus terencil adalah pada tahap yang amat rendah dan boleh menyebabkan ketakstabilan voltan (Yan et al. 2012).

Dalam analisis kestabilan voltan dinamik, adalah penting membangunkan model sistem dinamik bagi sistem fotovolta dan beban. Lazimnya, pemodelan komponen dalam sistem kuasa adalah menggunakan persamaan algebra dan persamaan kebezaan tak lurus. Untuk analisis kestabilan voltan dinamik, simulasi domain masa dilaksanakan untuk menunjukkan tindak balas dinamik sistem dengan lebih terperinci dalam tempoh masa tertentu (Liang 2011). Analisis keadaan mantap berdasarkan persamaan seimbang turut digunakan dalam analisis kestabilan voltan dinamik (Chen et al. 2013). Kaedah ini mempunyai kelebihan dari segi masa pengiraan yang pendek kerana perubahan jangka panjang dianggap malar. Selain itu, turut diperkenalkan dalam kajian kestabilan voltan adalah gabungan kaedah analisis dinamik dan statik (Hasani & Parniani 2005).

Beberapa kajian telah melakukan analisis fana dan menilai faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan voltan dinamik (Yagami et al. 2013). Dalam kajian ini, simulasi domain-masa digunakan dalam penilaian kestabilan voltan dinamik yang mana penumpuan diberikan terhadap kesan tenggelam-timbul sinaran suria, motor aruhan dan putusan talian. Sistem penghantaran IEEE 118 bus dan sistem agihan jejari 69 bus digunakan untuk meninjau kesan sistem fotovolta

tersambung-grid terhadap kestabilan voltan dinamik dalam sistem kuasa.

## PEMODELAN SISTEM DINAMIK

Bahagian ini menghuraikan dengan lebih lanjut model sistem yang digunakan untuk analisis kestabilan voltan dinamik yang mana penekanan diberikan kepada model penjana dinamik FVTG dan beban dinamik.

### SISTEM DINAMIK FOTOVOLTA

Pemodelan sistem dinamik FVTG tertumpu kepada pembinaan model FV, pengawal dan penyongsang FV. Rajah 1 menunjukkan gambarajah talian satu sistem dinamik FVTG dan topologi setara dengannya. Namun begitu, pembinaan sistem dinamik FVTG dalam perisian DigSILENT PowerFactory perlu dilakukan dalam bentuk blok seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.

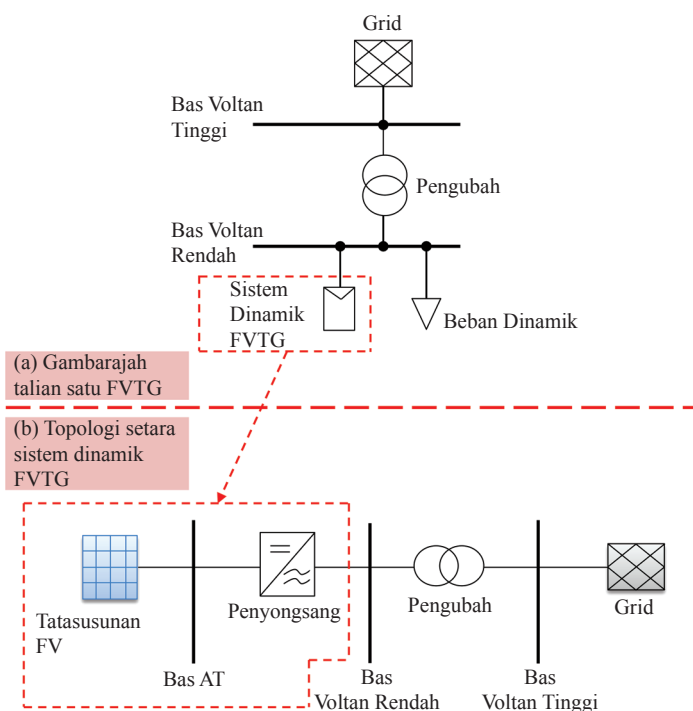
Dari Rajah 2, Blok 1, 2, 3 dan 4 mewakili komponen 'Sinaran Suria,' 'Suhu,' 'Model FV' dan 'Bas arus terus (AT) & Pemuat' yang membentuk bahagian AT bagi penyongsang. Blok 1 dan blok 2 masing-masing adalah blok 'Sinaran Suria' dan blok 'Suhu' yang mewakili data masukan dalam bentuk lembaran Excel. Sinaran suria dan suhu sel FV mempengaruhi arus dan voltan FV dan secara langsung mengubah kuasa keluaran penjana FV. Dalam kajian ini, data sinaran suria dan suhu FV diperolehi dari sistem FVTG 3 kW yang dipasang pada bangunan bangunan Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Blok 3 adalah 'Model FV' yang dibina berdasarkan litar setara sel solar yang mengandungi punca arus, diod selari dan rintangan siri. 'Model FV' juga mewakili tatasusunan FV yang mana operasi blok ini dipengaruhi oleh dua faktor luar, iaitu, sinaran suria dan suhu sel FV. Algoritma pengiraan arus keluaran bagi 'Model FV' adalah berdasarkan litar setara sel solar. Modul FV terhasil dari gabungan beberapa sel solar yang disambung secara siri dan selari. Operasi maksimum bagi modul FV ditentukan melalui titik persilangan pada lengkung I-V yang mana titik persilangan pada lengkung P-V pula dikenali sebagai titik kuasa maksimum,  $P_{mpp}$  yang mana nilainya berubah mengikut perubahan sinaran suria,  $G$  dan suhu sel solar,  $T$ . Oleh itu, persamaan kuasa aktif maksimum  $P_{mpp}$  bagi modul FV diberikan oleh,

$$P_{mpp} = (N_S \cdot V_{mpp}) \times (N_P \cdot I_{mpp}) \quad (1)$$

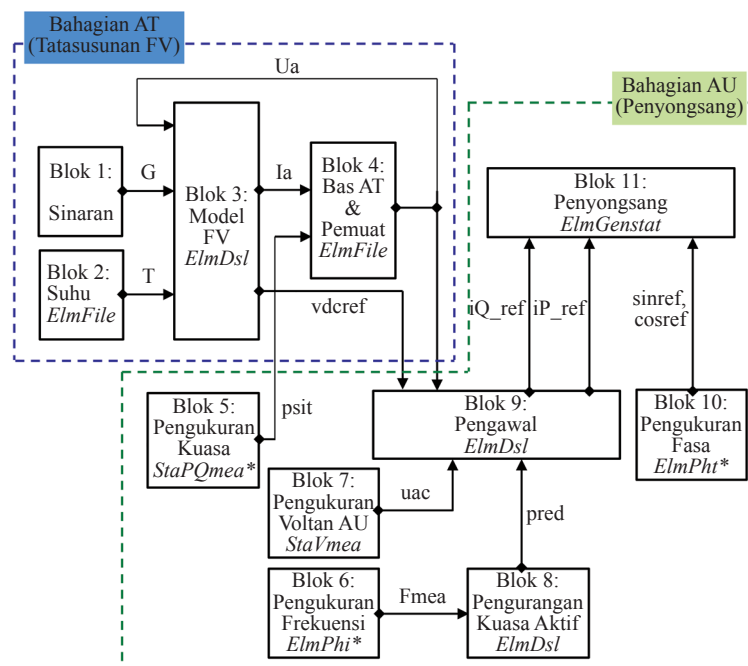
yang mana:

- $N_S$  : jumlah sel solar tersambung siri
- $N_P$  : jumlah sel solar tersambung selari
- $V_{mpp}$  : voltan pada titik kuasa maksimum
- $I_{mpp}$  : arus pada titik kuasa maksimum

Blok 4 adalah blok 'Bas AT & Pemuat' mewakili bas AT yang menghubungkan tatasusunan FV kepada penyongsang melalui pemuat pirau. Fungsi utama blok ini adalah untuk mengira arus yang mengalir melalui bus AT. Arus ini ditukar dalam per unit (p.u) dengan mengambil kira arus asas namaan,



RAJAH 1. (a) Gambarajah talian satu FVTG dan (b) Topologi setara sistem dinamik FVTG Monitor



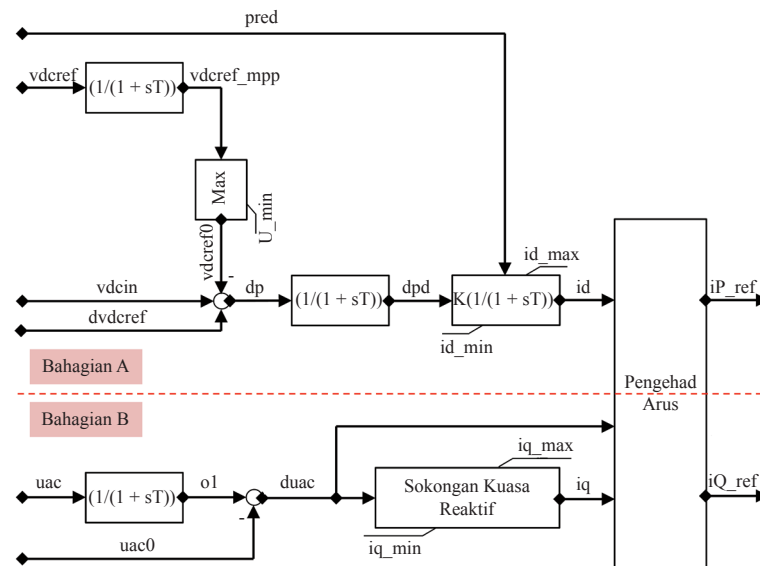
RAJAH 2. Blok sistem dinamik FVTG

yang dikira menggunakan voltan AT dan kuasa FV namaan. Seterusnya, pengkamiran arus dijalankan untuk mengira voltan yang merentasi pemuat. Voltan ini adalah voltan bas AT dan juga merupakan masukan ke ‘Blok 9: Pengawal.’ Sementara itu, Blok 5 hingga Blok 11 membentuk bahagian arus ulangalik (AU) penyongsang. Blok 5 adalah blok untuk pengukuran kuasa aktif pada titik sambungan sistem dinamik FV ke bas voltan rendah. Kuasa aktif yang telah diukur digunakan sebagai masukan ke ‘Blok 4: Bas AT dan Pemuat.’

Blok 6 pula adalah untuk pengukuran frekuensi yang mana blok ini merupakan salah satu komponen dalam sistem gelung terkunci fasa yang digunakan untuk mengukur frekuensi pada bas voltan rendah. Keluaran blok ini merupakan masukan ke Blok 8 untuk tujuan pengurangan kuasa aktif. Fungsi blok 7 adalah untuk mengukur voltan AU pada bas voltan rendah. Voltan ini kemudiannya digunakan sebagai masukan kepada ‘Blok 9: Pengawal.’ Blok 8 bertanggungjawab untuk pengurangan kuasa aktif dalam kes lencongan frekuensi.

Fungsi utama Blok 9, iaitu, ‘Pengawal’ adalah untuk mengawal aliran kuasa aktif dan reaktif ke grid. Blok ini menghasilkan komponen  $iP_{ref}$  dan  $iQ_{ref}$  yang merupakan nilai rujukan kuasa aktif dan reaktif bagi penyongsang. Blok 10 adalah untuk pengukuran fasa dan mengandungi sistem gelung terkunci fasa yang terdiri daripada tiga bahagian utama, iaitu pengesan fasa, penapis gelung dan pengayun voltan terkawal. Pegasan fasa menjana isyarat berkadaran dengan perbezaan voltan  $V$  dan  $V'$  manakala penapis gelung adalah penapis laluan rendah yang mengurangkan komponen AU berfrekuensi tinggi. Pengayun voltan terkawal pula berfungsi untuk menjana isyarat frekuensi yang dibandingkan dengan frekuensi yang diberi. Akhir sekali, Blok 11 mewakili penyongsang AT/AU yang bertindak sebagai blok rujukan yang berfungsi untuk menghubungkan keseluruhan sistem dinamik FVTG ke grid.

Rajah 3 menunjukkan komponen dalam ‘Blok 9: Pengawal’ yang mana Bahagian A dalam gambarajah pengawal adalah pengaturan voltan AT yang dilaksanakan untuk mengawal kuasa aktif. Nilai parameter  $vd_{ref}$  merupakan nilai voltan yang dikehendaki pada titik kuasa maksimum bagi tatasusunan FV. Untuk mengurangkan komponen frekuensi tinggi, nilai ini dihantar ke penapis laluan rendah dan seterusnya ke blok had rendah. Nilai ini dibandingkan dengan nilai voltan operasi minimum penyongsang,  $U_{min}$ . Perbandingan ini menyebabkan nilai  $vd_{ref}$  lebih tinggi dari  $U_{min}$ . Perbezaan antara  $vd_{cin}$  dan  $vd_{dref}$  memberikan nilai parameter,  $dp$  yang dihantar ke penapis laluan rendah untuk menghasilkan keluaran,  $d_{pd}$ . Nilai parameter,  $d_{pd}$  kemudiannya dihantar ke pengawal PI yang mempunyai gandaan berkadaran,  $K_p$  dan pengkamilan masa,  $Tip$ .



RAJAH 3. Komponen dalam ‘Blok 9: Pengawal’

Bahagian B dalam gambarajah pengawal adalah kawalan kuasa reaktif yang ada dalam perpustakaan DigSILENT PowerFactory. Nilai parameter  $uac$  diukur oleh peranti pengukuran voltan melalui penapis laluan rendah dan dibandingkan dengan voltan pada nilai rujukan keadaan mantap,  $uac0$  bagi membentuk sisihan voltan pada titik gandingan sepunya,  $duac$ . Perubahan voltan ini merupakan masukan kepada blok ‘Sokongan Kuasa Reaktif’ seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Blok ini menggunakan jalur mati sebanyak 10% daripada voltan namaan dan menentukan nilai  $iq$ . Jalur mati sebanyak 10% bermaksud bahawa kuasa reaktif tidak akan dijana atau diserap selagi sisihan voltan berada dalam 10% daripada voltan namaan. Komponen arus paksi-q,  $iq$  ditentukan melalui persamaan berikut,

$$iq = K|duac| \tag{2}$$

yang mana:

$K$  : parameter lelai (*droop*)

$duac$  : perbezaan antara voltan sebenar dan voltan keadaan mantap

Akhir sekali, nilai parameter  $id$ ,  $iq$  dan  $duac$  dihantar kepada blok ‘Pengehad Arus’ untuk menghasilkan nilai parameter rujukan,  $iP_{ref}$  dan  $iQ_{ref}$ . Blok ‘Pengehad Arus’ berfungsi sebagai penghad arus pada paksi-d semasa keadaan kerosakan litar pintas berdasarkan nilai arus pada paksi-q. Pengehad ini turut mengawal nilai parameter  $iP_{ref}$  semasa keadaan kerosakan yang mana tiada kuasa aktif dibekalkan. Juga, arus pada paksi-q adalah terhad antara arus mutlak maksimum dan minimum.

BEBAN DINAMIK

Dalam kajian ini, pemodelan beban dinamik adalah menggunakan motor aruhan di mana beban motor aruhan boleh memberi kesan kepada profil voltan dan kestabilan voltan sistem kuasa. Dalam perisian DigSILENT Power Factory, beban motor aruhan diwakili oleh mesin tak segerak. Model mesin ini adalah sama dengan model aruhan sangkar tunggal Jenis 6 yang sering digunakan dalam perdagangan dan

JADUAL 1. Parameter beban motor aruhan Jenis 6

Mesin Tak Segerak Jenis 6 (p.u)	
$R_s$	0.035
$X_s$	0.094
$X_m$	2.800
$R_r$	0.048
$X_r$	0.163

perindustrian (IEEE Task Force 1995; Pedra 2006). Parameter bagi motor aruhan Jenis 6 diberikan dalam Jadual 1.

Dalam Jadual 1,  $R_s$  adalah rintangan pemegun,  $X_s$  adalah regangan bocor pemegun,  $R_r$  adalah rintangan pemutar,  $X_r$  adalah regangan bocor pemutar manakala  $X_m$  adalah regangan memagnet.

#### KAEDAH PENILAIAN KESTABILAN

Penilaian kestabilan voltan dinamik dijalankan dengan menggunakan simulasi domain-masa. Tujuan utama adalah untuk mengenalpasti faktor dinamik yang membawa kepada ketakstabilan voltan serta tindakbalas sistem terhadap faktor tersebut. Kajian kes kestabilan voltan dinamik dilakukan dengan mengambil kira tiga faktor, iaitu, kesan tenggelam-timbul sinaran suria, kesan beban dinamik dan kesan putusan talian terhadap kestabilan voltan dinamik. Kaedah kajian dijelaskan seperti berikut:

1. Kajian Kes 1 adalah untuk mengkaji kesan tenggelam-timbul sinaran suria terhadap kestabilan voltan dinamik. Data sinaran suria diambil dari sistem FVTG 3 kW yang dipasang di bangunan Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia. Proses simulasi domain-masa dilakukan dengan menempatkan penjana FVTG pada bas yang paling lemah dan tahap maksimum penembusan penjana FVTG.
2. Kajian Kes 2 adalah untuk mengkaji kesan beban dinamik seperti motor aruhan dan kesan putusan talian terhadap kestabilan voltan dinamik. Simulasi dijalankan dengan penjana FVTG ditempatkan pada bas yang paling lemah dalam sistem ujian dan tahap penembusan penjana FVTG adalah maksimum. Turut diambil kira adalah sinaran suria yang tenggelam-timbul dan beban dinamik berada pada nilai maksimum.

Proses simulasi kestabilan voltan dinamik untuk kajian kesan tenggelam-timbul sinaran suria dan kesan beban dinamik seperti motor aruhan (Kes 1 dan Kes 2) diterangkan seperti berikut:

Langkah 1: Bina sistem ujian dalam perisian DigSILENT PowerFactory.

Langkah 2: Tempatkan sistem FVTG pada bas yang paling lemah.

Langkah 3: Tetapkan tahap maksimum penembusan FVTG dan nilai maksimum beban dinamik yang mana nilai adalah berdasarkan keputusan dalam kajian kestabilan statik.

Langkah 4: Lakukan simulasi aliran beban. Jika aliran beban menyimpang, simulasi dihentikan. Jika tidak, simulasi diteruskan dan keputusan aliran beban direkodkan.

Langkah 5: Lakukan simulasi domain-masa dalam tempoh masa 100 s berdasarkan data sinaran suria dan suhu sistem FVTG.

Langkah 6: Keputusan direkodkan. Plot domain-masa untuk analisis Kajian Kes 1 dan Kes 2.

Langkah 7: Proses simulasi Kes 1 dan Kes 2 selesai.

Proses simulasi kestabilan voltan dinamik untuk kajian putusan talian (Kes 2) diterangkan seperti berikut:

Langkah 1: Tetapkan senario gangguan dan pembilang. Kriteria gangguan yang digunakan adalah N-1 untuk putusan talian.

Langkah 2: Lakukan simulasi putusan talian pada masa 30 s. Jika simulasi dalam Langkah 2 telah selesai, keputusan voltan pada setiap talian direkodkan. Jika tidak, penambahan pembilang ditingkatkan dan Langkah 2 diulangi.

Langkah 3: Keputusan simulasi direkodkan.

Langkah 4: Proses simulasi kajian putusan talian selesai.

#### KEPUTUSAN KAJIAN KES

Bahagian ini membincangkan keputusan penilaian kestabilan voltan dinamik dalam sistem ujian dengan sistem FVTG. Dua kajian kes telah dipertimbangkan yang mana Kajian Kes pertama adalah analisis kesan tenggelam-timbul sinaran suria. Kajian Kes 2 pula adalah analisis kesan beban dinamik dan putusan talian terhadap kestabilan voltan dinamik yang mana simulasi domain-masa dijalankan dengan mengambil kira penempatan penjana FVTG pada bas yang paling lemah, iaitu, Bas 117 dan Bas 61, masing-masing untuk sistem IEEE 118 bas dan IEEE 69 bas. Bas yang paling lemah ditentukan terdahulu melalui penilaian kestabilan voltan statik yang dibuat dengan menggunakan indeks kestabilan voltan (Kamaruzzaman & Mohamed 2015). Simulasi domain-masa dilakukan pada tahap maksimum penembusan FVTG, iaitu 2% bagi sistem IEEE 118 bas dan 60% bagi sistem IEEE 69 bas.

#### KAJIAN KES 1 – KESAN TENGGELAM-TIMBUL SINARAN SURIA

Matlamat utama kajian kes ini adalah untuk mengkaji kesan tenggelam-timbul sinaran suria akibat dari kejadian lindungan awan terhadap kestabilan voltan dinamik. Dalam kajian ini, data sinaran suria dan suhu FV diperolehi dari sistem FVTG 3 kW yang dipasang pada bumbung bangunan Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, UKM. Data sinaran suria yang direkodkan adalah dalam tempoh masa 24 jam pada 19 September 2014. Namun begitu, untuk mengurangkan masa simulasi dan kerumitan proses simulasi, masa data ini diubah kepada 100 s. Maka, simulasi domain masa telah dijalankan dalam tempoh masa 100 s. Rajah 4(a) menunjukkan sinaran suria dengan simulasi masa 100 s manakala Rajah 4(b) menunjukkan kejatuhan sinaran suria pada sela masa 54.26 s hingga 57.23 s. Kesan kejatuhan sinaran suria ini terhadap kestabilan voltan dinamik dikaji.



Untuk had voltan operasi, diguna pakai panduan teknikal grid yang dikeluarkan oleh Tenaga Nasional Berhad (TNB) bagi sambungan penjana FV ke dalam rangkaian kuasa voltan rendah dan voltan sederhana. Panduan ini dengan jelas menggariskan bahawa sisihan voltan maksimum yang dibenarkan bagi turun-naik voltan yang berpunca dari tenggelam-timbul sinaran suria adalah 6% (TNB 2017). Oleh sebab itu, piawaian tersebut telah digunakan sebagai had voltan operasi dalam kajian ini.

Berdasarkan Rajah 5, voltan Bas 117 mengalami kejatuhan mendadak pada sela masa 54 s hingga 57 s disebabkan kejatuhan sinaran suria pada sela masa yang sama. Dalam tempoh masa 3 s tersebut, sistem beroperasi pada voltan melebihi -6% sisihan voltan yang dibenarkan dan keadaan ini boleh menyebabkan ketakstabilan voltan dalam sistem IEEE 118 bas. Situasi yang sama turut berlaku dalam sistem agihan 69 bas seperti ditunjukkan dalam Rajah 6 yang mana Bas 61 mengalami ketakstabilan voltan dalam sela masa tertentu. Secara amnya, dapat disimpulkan bahawa tenggelam-timbul sinaran suria yang berpunca dari kejadian lindungan awan boleh memberi kesan terhadap kestabilan voltan dalam sistem kuasa. Kejatuhan voltan secara mendadak boleh menyebabkan berlakunya perlanggaran julat voltan operasi yang telah ditetapkan.

#### KAJIAN KES 2 – KESAN BEBAN DINAMIK DAN PUTUSAN TALIAN

Dalam kajian kes ini, penumpuan diberikan ke atas kesan beban dinamik, iaitu, permulaan motor aruhan dan kesan putusan talian terhadap kestabilan voltan dinamik. Simulasi domain-masa dijalankan dalam tempoh 100 s. Dalam kajian ini, permulaan motor berlaku dalam tempoh 5 s dan kemudian kejadian putusan talian dilakukan pada 30 s dalam tempoh masa yang diberikan. Bagi sistem ujian IEEE 118 bas, beban dinamik motor aruhan dipasang pada Bas 117 dan putusan talian berlaku pada talian 12-117. Rajah 7 menunjukkan voltan permulaan motor pada Bas 117. Kejatuhan voltan telah berlaku pada masa 0 s hingga 1 s yang mana voltan awal 0.9860 (p.u) telah menurun kepada 0.9493 (p.u). Dalam tempoh 5 s permulaan motor, voltan minimum yang telah direkodkan adalah 0.9480 (p.u) pada sela masa 0.1826 s hingga 0.2026 s. Walaupun kejatuhan voltan telah berlaku secara mendadak, namun bas ujian masih beroperasi dalam julat yang dibenarkan. Arus mula motor aruhan dalam simulasi ini adalah 3.701 (p.u). Selepas 5 s, voltan kembali pulih dan simulasi diteruskan dengan putusan talian pada masa 30 s.

Rajah 8 menunjukkan voltan pada Bas 117 ketika berlaku putusan talian pada talian 12-117. Berdasarkan rajah tersebut, voltan Bas 117 pada 30 s adalah 0.4452 (p.u) dan merudum ke sifar. Hal ini terjadi kerana ketika putusan talian berlaku, Bas 117 telah terpisah daripada sistem dan kepulauan berlaku. Oleh itu, bekalan kuasa yang diterima dari sistem terputus. Untuk memastikan Bas 117 beroperasi pada voltan yang selama, aliran kuasa reaktif perlu dikekalkan pada nilai tertentu. Namun begitu, Bas 117 hanya dapat menerima bekalan kuasa aktif dari penjana FVTG. Tambahan pula, pada

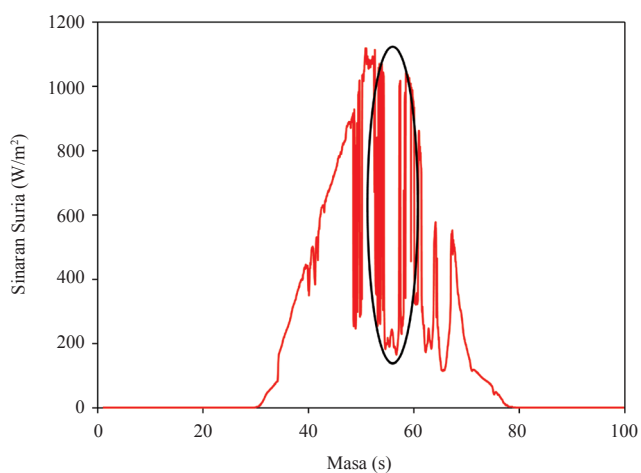
ketika ini, motor aruhan mengalami nyahpecutan. Motor tidak dapat kembali kepada keadaan keseimbangan operasi dan keadaan ini menyebabkan voltan di Bas 117 menjadi sifar. Berdasarkan keputusan kajian kes ini, voltan Bas 117 menyusut dan tidak kembali kepada keadaan keseimbangan voltan operasi. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa putusan talian pada talian 12-117 telah menyebabkan ketakstabilan voltan sistem ujian IEEE 118 bas dan seterusnya membawa kepada keruntuhan voltan.

Bagi sistem agihan 69 bas, beban motor aruhan disambung pada Bas 61 dan putusan talian berlaku pada talian 60-61. Rajah 9 menunjukkan voltan permulaan motor pada Bas 61 yang mana voltan awal operasi adalah 1.03 (p.u). Voltan minimum yang telah direkodkan dalam tempoh 5s permulaan motor adalah 0.8261 (p.u). Voltan bas kemudiannya meningkat kepada 0.8485 (p.u) selepas 5 s. Kejatuhan voltan bas yang disebabkan oleh permulaan motor telah menjejaskan kestabilan voltan kerana bas ujian telah melanggar had voltan minima 0.9 (p.u). Simulasi kemudiannya diteruskan dengan melakukan putusan talian pada talian 60-61 dan pada masa 30 s.

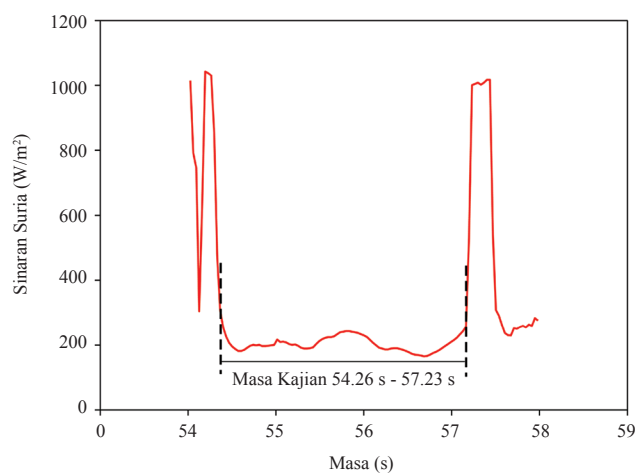
Rajah 10 pula menunjukkan voltan di Bas 61 ketika berlaku putusan talian pada talian 60-61. Berdasarkan Rajah 10, voltan di Bas 61 telah jatuh kepada 0.3952 (p.u) dan kemudiannya, voltan bas kekal sifar sehingga tamat simulasi. Putusan talian 60-61 telah menyebabkan Bas 61 hingga Bas 65 terpisah dari sistem ujian. Bekalan kuasa yang diterima dari sistem ujian serta sistem FVTG tidak dapat menampung kestabilan voltan dan telah menyebabkan berlakunya voltan runtuh pada Bas 61 hingga Bas 65. Keputusan menunjukkan bahawa putusan talian yang berlaku pada talian 60-61 telah menyebabkan ketakstabilan voltan dalam sistem agihan 69 bas.

#### KESIMPULAN

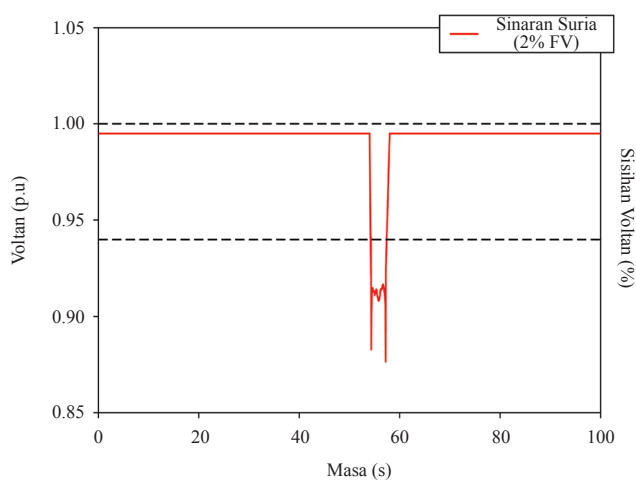
Kesan penjana FVTG terhadap kestabilan voltan dinamik dalam sistem kuasa telah dikaji dengan mengambil kira faktor tenggelam timbul sinaran suria, motor aruhan serta putusan talian. Sinaran suria telah diramal berpandukan pola harian dan musim. Namun, perubahan cuaca di Malaysia adalah tidak menentu terutamanya disebabkan oleh pergerakan awan seperti terdapat pada rekod data sinaran suria yang diperolehi dari sistem FVTG 3 kW. Kajian mendapati kejatuhan keluaran kuasa penjana FVTG secara mendadak menyebabkan ketakstabilan voltan dinamik yang mana bas mengalami kejatuhan voltan melebihi 6% sisihan voltan yang dibenarkan. Gangguan dinamik seperti permulaan motor aruhan turut menjejaskan kestabilan voltan dan ini dapat dilihat dalam keputusan kajian ke atas sistem penghantaran IEEE 118 bas dan sistem agihan 69 bas. Kehadiran penjana FVTG dan motor aruhan pada bas tersebut tidak dapat membantu mengekalkan keseimbangan voltan bas yang akhirnya membawa kepada keruntuhan voltan.



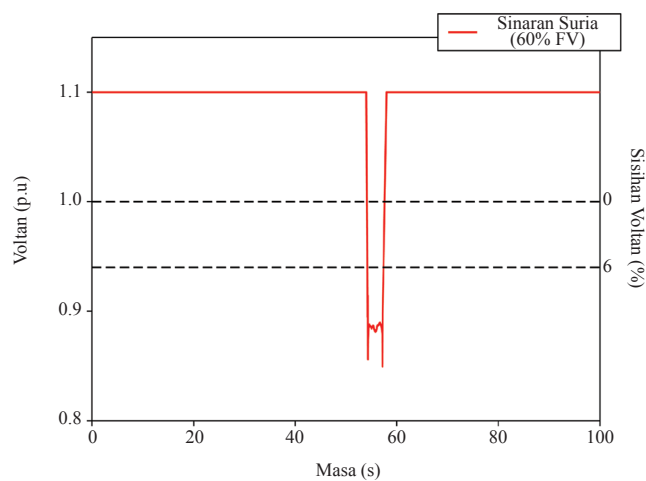
RAJAH 4(a). Sinaran suria ( $W/m^2$ )



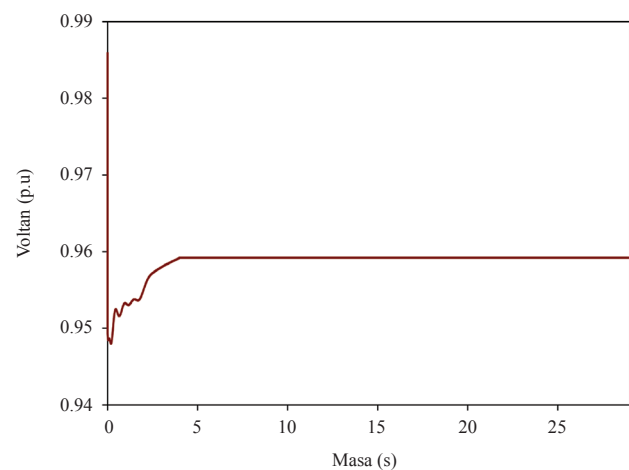
RAJAH 4(b). Kajian tenggelam-timbul sinaran suria



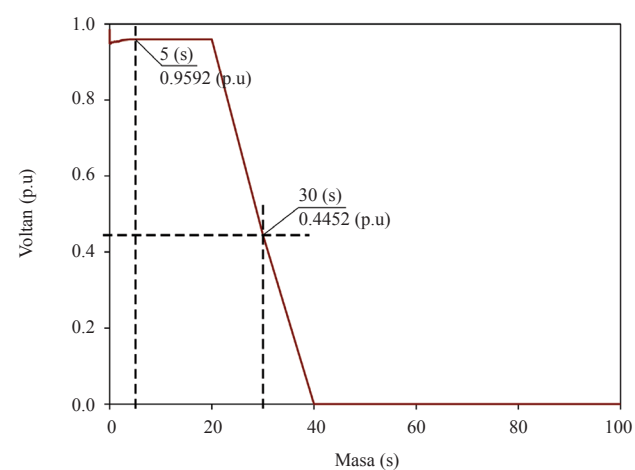
RAJAH 5. Kesan tenggelam-timbul sinaran suria terhadap voltan Bas 117 dalam sistem IEEE 118 bas



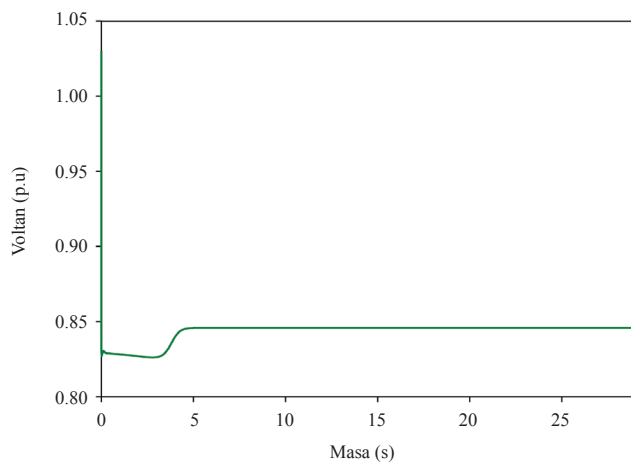
RAJAH 6. Kesan tenggelam-timbul sinaran suria terhadap voltan Bas 61 dalam sistem agihan 69 bas



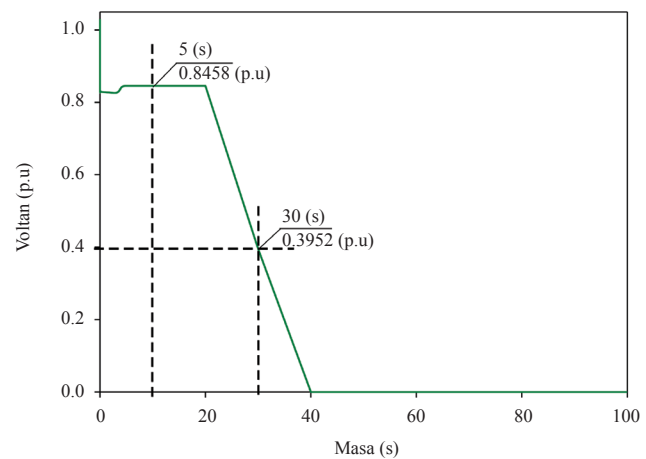
RAJAH 7. Voltan permulaan motor pada Bas 117



RAJAH 8. Voltan pada Bas 117 ketika putus talian



RAJAH 9. Voltan permulaan motor pada Bas 6



RAJAH 10. Voltan pada Bas 61 ketika putus talian

## PENGHARGAAN

Penulis ingin memberi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia kerana memberi bantuan kewangan di bawah projek GP-K005302.

## RUJUKAN

- Chen, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Zhang, Y. & Song, L. 2013. A full dynamic voltage stability research based on time-domain simulation. *Journal on Energy and Power Engineering* 5(4): 769-773.
- Eftekharijad, S., Vittal, V., Heydt, G.T., Keel, B. & Loehr, J. 2013. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 28(2): 893-901.
- Hahn, C.J. & Warren, S.G. 2007. A gridded climatology of clouds over land (1971-1996) and ocean (1954-1997) from surface observations worldwide. *Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information Analysis Center*. [https://atmos.washington.edu/~sgw/.../2007\\_ndp026e.pdf](https://atmos.washington.edu/~sgw/.../2007_ndp026e.pdf) [18 November 2017]
- Hasani, M. & Pamiani, M. 2005. Method of combined static and dynamic analysis of voltage collapse in voltage stability assessment. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific 2005*, 1-6.
- Kamaruzzaman, Z.A. & Mohamed, A. 2015. Static voltage stability analysis in a distribution system with high penetration of photovoltaic generation. *Przeglad Elektrotechniczny* 91(8): 113-117
- Liang, Y.C. 2011. An overview of dynamic analysis about the voltage's stability of bulk power system. *China Science & Technology Panorama Magazine* 14: 294-296.
- Marcos, J., Marroyo, L., Lorenzo, E. & Garcia, M. 2012. Power output fluctuations in large PV plants. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality 2012* 19: 1276-1281.

- Olken, M. 2013. The sun keeps shining: updates on large-scale solar energy. *IEEE Power Energy Magazine* 11(2): 4-6.
- Yagami, M., Kimura, N., Tsuchimoto, M., Tamura, J. 2013. Power system transient stability analysis in the case of high-penetration photovoltaic, *IEEE PowerTech 2013*, 1-6.
- Yan, R. & Saha, T. K. 2012. Investigation of voltage stability for residential customers due to high photovoltaic penetrations, *IEEE Transactions on Power Systems* 27(2): 651-662.

Zetty Adibah Kamaruzzaman  
Centre for Integrated Systems Engineering and Advanced Technologies (INTEGRA)

\*Azah Mohamed  
Nor Azwan Mohamed Kamari  
Centre for Integrated Systems Engineering and Advanced Technologies (INTEGRA),  
Programme for Electrical  
Electronic and System Engineering  
Faculty of Engineering & Built Environment  
Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia.

\*Corresponding author; email: azah\_mohamed@ukm.edu.my

Received date: 18<sup>th</sup> March 2018  
Accepted date: 17<sup>th</sup> July 2018  
Online First date: 1<sup>st</sup> September 2018  
Published date: 31<sup>st</sup> October 2018