

PERPUSTAKAAN UMP



0000104499

**PENEMPATAN DAN PENSAIZAN OPTIMUM BAGI PENJANA TERAGIH
DALAM SISTEM KUASA UNTUK PENINGKATAN KESTABILAN
VOLTAN**

RUHAIZAD BIN ISHAK

**TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH
DOKTOR FALSAFAH**

**FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI**

2015

ABSTRAK

Pada masa kini, kebanyakan sistem kuasa beroperasi dengan muatan beban yang tinggi serta menghampiri had kestabilan voltan disebabkan kekurangan rizab kuasa. Keadaan ini sekiranya berterusan boleh mengakibatkan kawasan yang lemah dalam sistem tersebut menghadapi masalah ketakstabilan voltan. Isu ketakstabilan voltan merupakan salah satu cabaran utama dalam operasi sistem kuasa. Salah satu strategi penyelesaian yang dianggap sesuai untuk meningkatkan kestabilan voltan dan kebolehpercayaan sistem pengagihan adalah dengan menggunakan unit Penjanaan Teragih (PT). Di samping pelbagai manfaat yang dijangkakan dari penggunaan PT, kewujudan sejumlah besar unit PT dalam sistem pengagihan sebaliknya boleh menimbulkan pelbagai masalah dari segi sudut operasi dan ekonomi. Oleh itu, bagi memastikan manfaat yang maksimum boleh diperolehi dari kehadiran sejumlah besar PT dalam sistem pengagihan, penentuan penempatan dan saiz unit PT secara optimum perlu dilakukan. Fokus tesis ini adalah untuk membangunkan satu formulasi pengoptimuman yang baru untuk menyelesaikan masalah penempatan dan pensaizan optimum PT dengan menimbang fungsi berbilang objektif untuk menyasarkan peningkatan kestabilan voltan, pengurangan kehilangan kuasa dan pengurangan kos PT. Satu indeks kestabilan voltan baru yang dinamakan Indeks Kestabilan Kuasa Maksimum (IKKM) telah dibangunkan untuk mengenal pasti bas sensitif dalam sistem kuasa yang mudah terdedah kepada keruntuhan voltan. Pengolahan indeks IKKM dibuat bersandarkan kepada gabungan konsep pemindahan kuasa maksimum dan teori kestabilan sistem dua bas. Bagi menyelesaikan masalah pengoptimuman pula, Algoritma Carian Jejak-balik (ACJ) yang merupakan satu teknik pengoptimuman heuristik yang agak baru telah diguna pakai dalam kajian. Pengesahan keseluruhan ACJ yang dicadangkan telah dilakukan ke atas dua sistem ujian, iaitu, IEEE 30-bas dan sistem pengagihan 69-bas. Selain itu, keberkesanan teknik pengoptimuman ini juga telah dibandingkan dengan teknik pengoptimuman heuristik yang lain seperti Pengoptimuman Kerumun Zaraf (PKZ) dan Algoritma Genetik (AG). Hasil kajian menunjukkan bahawa indeks IKKM yang dicadangkan dapat mengenal pasti dengan tepat bas beban yang terdedah kepada keruntuhan voltan. Keputusan menunjukkan peningkatan tahap kestabilan voltan yang memuaskan telah dicapai melalui penempatan PT yang optimum. Manakala dalam penentuan kapasiti PT, cadangan model pengoptimuman yang memberi penekanan terhadap kedua-dua manfaat teknikal dan ekonomi telah menunjukkan prestasi sistem yang terbaik dari aspek kehilangan kuasa serta kos pelaburan PT yang optimum. Selain itu, hasil keputusan menunjukkan bahawa pengoptimuman menggunakan ACJ memberikan prestasi terbaik berbanding dengan PKZ dan AG dari segi masa pengkomputeran dan kadar kejayaan dalam mencapai penumpuan sejagat.

OPTIMAL PLACEMENT AND SIZING OF DISTRIBUTED GENERATORS IN POWER SYSTEMS FOR VOLTAGE STABILITY IMPROVEMENT

ABSTRACT

Presently, power systems are heavily loaded and operated closer to the stability limit due to lack of power reserves. Such condition would lead to voltage instability in weak areas of a power system and this issue is being regarded as one of the major challenges in power system operation. One of the viable options for improving voltage stability and increased reliability is by installing small Distributed Generation (DG) in a distribution system. Besides the expected benefits of DG, the presence of large number of DG units in a distribution system can create both operational and economic problems. Thus, to achieve maximum benefits from installation of large number of DG, the DG units have to be optimally placed and sized in a power system. The focus of the thesis is to develop a new optimisation problem formulation for determining optimal placement and sizing of DG by considering multiple objectives which include voltage stability improvement, minimisation of power losses and minimisation of DG costs. A new voltage stability index named as the Maximum Power Stability Index (MPSI) has been developed to identify the sensitive buses prone to voltage collapse. The proposed MPSI is based on the concept of maximum power transfer and voltage stability theory of a two-bus system. To solve the optimisation problem, the Backtracking Search Algorithm (BSA) which is a relatively new heuristic optimisation technique is applied. The proposed BSA has been validated on two test systems, namely, the IEEE 30-bus and 69-bus distribution systems and compared with other heuristic optimisation techniques namely the Particle Swarm Optimisation (PSO) and Genetic Algorithm (GA). The results showed that the proposed MPSI can correctly identify the load buses that are susceptible to voltage collapse. The optimal DG placement showed sufficient improvement is attainable in the level of voltage stability. As for the sizing results, the developed optimisation model which emphasizes on both technical and economic benefits gives the best system performance for power losses with optimal DG investment costs. The results also showed that the BSA gives the best performance compared to PSO and GA in terms of computation time and success rate of reaching global convergence.

KANDUNGAN

	Halaman	
PENGAKUAN	ii	
PENGHARGAAN	iii	
ABSTRAK	iv	
ABSTRACT	v	
KANDUNGAN	vi	
SENARAI JADUAL	x	
SENARAI ILUSTRASI	xi	
SENARAI SIMBOL	xiii	
SENARAI SINGKATAN	xv	
BAB I	PENDAHULUAN	
1.1	Latar Belakang Kajian	1
1.2	Penyataan Masalah Kajian	3
1.3	Objektif Dan Skop Kajian	4
1.4	Rangka Tesis	5
BAB II	TINJAUAN KÉPUSTAKAAN	
2.1	Pengenalan	8
2.2	Penjana Teragih Dalam Sistem Kuasa	8
2.2.1	Takrifan penjana teragih	9
2.2.2	Kelebihan penjana teragih	10
2.3	Kesan Penjana Teragih Terhadap Sistem Kuasa	12
2.3.1	Kesan penjana teragih terhadap kestabilan voltan	12
2.3.2	Kesan penjana teragih terhadap kehilangan kuasa	12
2.3.3	Kesan penjana teragih terhadap kos	13

2.4	Kestabilan Voltan Dalam Sistem Kuasa	14
2.4.1	Kestabilan voltan menggunakan analisis kepekaan	16
2.4.2	Kestabilan voltan menggunakan analisis modal	17
2.4.3	Kestabilan voltan menggunakan indeks	17
2.5	Penempatan dan Pensaizan Optimum Bagi Penjana Teragih	19
2.5.1	Pengoptimuman penjana teragih menggunakan pendekatan konvensional	20
2.5.2	Pengoptimuman penjana teragih menggunakan teknik pengoptimuman heuristik	23
2.6	Ringkasan	27
BAB III	PEMBANGUNAN INDEKS KESTABILAN VOLTAN	
3.1	Pengenalan	28
3.2	Analisis Aliran Kuasa dan Kestabilan Voltan	28
3.3	Indeks Kestabilan Voltan Sistem Kuasa	31
3.3.1	Indeks Kestabilan Pemindahan Kuasa	33
3.3.2	Indeks Ramalan Keruntuhan Voltan	35
3.4	Cadangan Indeks Kestabilan Kuasa Maksimum	37
3.5	Ringkasan	42
BAB IV	PENEMPATAN DAN PENSAIZAN OPTIMUM BAGI PENJANA TERAGIH	
4.1	Pengenalan	43
4.2	Teknik Pengoptimuman Heuristik	44
4.2.1	Algoritma Carian Jejak-balik	45
4.3	Pengoptimuman Penjana Teragih Dalam Sistem Kuasa	46
4.3.1	Pengoptimuman penempatan penjana teragih	48
4.3.2	Pengoptimuman saiz penjana teragih	53
4.3.2.1	Rumusan pengoptimuman pensaizan PT	54
4.4	Pengoptimuman Berbilang Objektif Bagi Penyepaduan Penjana Teragih	57

4.4.1	Kos penjana teragih	59
4.4.1.1	Model penjana teragih	60
4.4.2	Rumusan pengoptimuman penjana teragih berdasarkan fungsi objektif berbilang	60
4.4.2.1	Penentuan faktor pemberat	62
4.4.3	Lengkung permintaan beban	63
4.5	Ringkasan	65
BAB V	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
5.1	Pengenalan	66
5.2	Sistem Kuasa Ujian	66
5.3	Keputusan Indeks Kestabilan Voltan	68
5.3.1	Penilaian IKKM pada kes asas	69
5.3.2	Penilian IKKM pada peningkatan beban di bas tunggal	69
5.3.2.1	Kenaikan beban pada bas di hujung rangkaian	69
5.3.2.2	Kenaikan beban pada bas di pusat rangkaian	71
5.3.3	Penilaian IKKM pada kemungkinan peningkatan beban Di bas penilaian	72
5.3.4	Penilaian IKKM pada kemungkinan kehilangan talian penghantaran	74
5.3.4.1	Kehilangan talian penghantaran tunggal	74
5.3.4.2	Kehilangan talian penghantaran berbilang	76
5.4	Perbandingan Indeks Kestabilan Voltan	77
5.4.1	Perbandingan indeks pada kemungkinan peningkatan beban di bas tunggal	77
5.4.2	Perbandingan indeks pada kemungkinan peningkatan beban di bas berbilang	79
5.4.3	Perbandingan indeks pada kemungkinan kehilangan talian penghantaran	81
5.5	Kesan Penempatan Dan Pensaizan Penjana Teragih	83
5.5.1	Hubungan penempatan PT dan kestabilan voltan	83
5.5.2	Hubungan pensaizan PT dan kehilangan kuasa	87
5.6	Penempatan Dan Pensaizan Optimum Penjana Teragih	88
5.6.1	Pengoptimuman PT berdasarkan objektif tunggal	89
5.6.2	Pengoptimuman PT berdasarkan objektif berbilang	98
5.7	Ringkasan	102

BAB VI	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
6.1	Kesimpulan	103
6.2	Sumbangan Utama Kajian	104
6.3	Cadangan Kajian Penerusan	105
RUJUKAN		107
LAMPIRAN		120
A	Data Masukan Bagi Sistem Penghantaran IEEE 30-Bas	120
B	Data Masukan Bagi Sistem Penghantaran 69-Bas	124
C	Keputusan Nilai IKKM Bagi Beban Asal Sistem Penghantaran IEEE 30-Bas	129
D	Keputusan Nilai IKKM Bagi Beban Asal Sistem Penghantaran 69-Bas	130
E	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Terletak Di Hujung Rangkaian Bagi Sistem IEEE 30-Bas	131
F	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Terletak Di Hujung Rangkaian Bagi Sistem 69-Bas.	132
G	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Terletak Di Pusat Rangkaian Bagi Sistem IEEE 30-Bas	133
H	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Terletak Di Pusat Rangkaian Bagi Sistem 69-Bas	134
I	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Berbilang Bagi Sistem IEEE 30-Bas	135
J	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Pertambahan Beban Pada Bas Berbilang Bagi Sistem 69-Bas	136
K	Keputusan IKKM Untuk Kemungkinan Kehilangan Talian Bagi Sistem IEEE 30-Bas	137
L	Keputusan IPV Untuk Pemasangan Unit PT Bagi Sistem IEEE 30-Bas	138
M	Keputusan IPV Untuk Pemasangan Unit PT Bagi Sistem 69-Bas	140
N	Senarai Penerbitan Kertas Kerja	143

SENARAI JADUAL

No. Jadual	Halaman
2.1 Kategori PT mengikut saiz	10
4.1 Spesifikasi unit penjana gas asli	60
4.2 Penetapan nilai pemberat	63
4.3 Kadar permintaan beban waktu puncak bagi IEEE 30-bas	64
4.4 Kadar permintaan beban waktu puncak bagi sistem 69-bas	64
5.1 IKKM tertinggi untuk sistem IEEE 30-bas	69
5.2 IKKM tertinggi untuk sistem 69-bas	69
5.3 Perbandingan nilai indeks bagi kenaikan beban di bas 26	78
5.4 Perbandingan nilai indeks bagi kenaikan beban di bas 10 dan 26	80
5.5 Perbandingan nilai indeks bagi kehilangan talian penghantaran antara bas 6 dan bas 7	82
5.6 Nilai parameter kawalan bagi ACJ, PKZ dan AG	89
5.7 Keputusan penentuan lokasi PT optimum bagi sistem 30-bas	89
5.8 Keputusan penentuan lokasi PT optimum sistem 69-bas	90
5.9 Keputusan pensaizan optimum bagi sistem 30-bas	92
5.10 Keputusan pensaizan optimum bagi sistem 69-bas	93
5.11 Perbandingan prestasi sistem bagi pemasangan PT dalam IEEE 30-bas	97
5.12 Perbandingan prestasi sistem bagi pemasangan PT dalam sistem 69-bas	98
5.13 Pensaizan optimum PT berdasarkan objektif berbilang bagi sistem 30-bas	99
5.14 Pensaizan optimum PT berdasarkan objektif berbilang bagi sistem 69-bas	101

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah	Halaman
2.1 Sistem kuasa elektrik dengan penjana teragih.	9
2.2 Manfaat penjana teragih	11
2.3 Objektif pengoptimuman penjana teragih	20
2.4 Teknik pengoptimuman heuristik	24
3.1 Litar setara Thevenin bagi sistem dua bas	33
3.2 Sistem dua bas	38
3.3 Ciri-ciri elektrik bagi sistem dua-bas	39
4.1 Carta alir ACJ bagi penyelesaian masalah pengoptimuman	47
4.2 Carta alir bagi penentuan lokasi PT yang optimum	52
4.3 Kehilangan kuasa diwakili graf fungsi kuadratik	53
4.4 Litar dua-bas	54
4.5 Carta alir bagi penentuan saiz PT yang optimum	58
4.6 Lengkung beban harian	65
5.1 Sistem penghantaran IEEE 30-bas	67
5.2 Sistem pengagihan 69-bas	68
5.3 IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem IEEE 30-bas dengan pertambahan beban di bas 26	70
5.4 IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem 69-bas dengan pertambahan beban di bas 65	70
5.5 IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem 30-bas dengan pertambahan beban di bas 10	72
5.6 IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem 69-bas dengan pertambahan beban di bas 13	72
5.7 IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem 30-bas dengan pertambahan beban di bas 10 dan bas 26	73

5.8	IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem 69-bas dengan pertambahan Beban di bas 13 dan bas 65	74
5.9	IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem IEEE 30-bas tanpa kehilangan talian penghantaran	75
5.10	IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem IEEE 30-bas tanpa kehilangan talian penghantaran tunggal	76
5.11	IKKM pada 5 bas kritikal bagi sistem IEEE 30-bas tanpa kehilangan talian penghantaran berbilang	77
5.12	Perubahan nilai indeks dan voltan pada bas 26	78
5.13	Perbandingan nilai indeks dan voltan pada bas 30	81
5.14	Perubahan nilai indeks dan voltan bagi kehilangan talian pada bas 7	83
5.15	Lengkung P-V bagi bas 26	84
5.16	Jidar kuasa aktif beban bagi sistem IEEE 30-bas	85
5.17	Profil voltan bagi pemasangan PT tunggal sistem IEEE 30-bas	85
5.18	Profil voltan bagi pemasangan PT berbilang sistem IEEE 30-bas	86
5.19	Hubungan jumlah kehilangan kuasa dan saiz PT	87
5.20	Lengkungan penumpuan bagi lokasi PT tunggal dalam sistem 30-bas	91
5.21	Lengkungan penumpuan bagi lokasi PT tunggal dalam sistem 69-bas	91
5.22	Lengkungan penumpuan bagi menentukan saiz optimum PT tunggal dalam sistem 30-bas	95
5.23	Lengkungan penumpuan bagi menentukan saiz optimum PT tunggal dalam sistem 69-bas	95
5.24	Profil voltan sebelum dan selepas pemasangan unit PT bagi sistem 30-bas	96
5.25	Profil voltan sebelum dan selepas pemasangan unit PT bagi sistem 69-bas	97

SENARAI SIMBOL

V_i, V_j, V_k, V_m	Magnitud voltan pada bas
Y_{jj}, Y_{kk}	Admitans kendiri pada bas
Y_{ij}, Y_{km}	Admitans antara bas
S_k	Kuasa ketara pada bas
S_L	Kuasa ketara beban
P_i, P_j, P_k	Kuasa aktif pada bas
Q_i, Q_j, Q_k	Kuasa reaktif pada bas
P_L	Kuasa aktif beban
I_L	Magnitud arus beban
V_L	Magnitud voltan beban
Z_L	Impedans beban
R_L	Rintangan beban
X_L	Regangan beban
V_s	Magnitud voltan sumber
Z_s	Impedans sumber
R_s	Rintangan sumber
X_s	Regangan sumber
Z_{Thev}	Impedans setara Thevenin
E_{Thev}	Voltan setara Thevenin
δ_i, δ_j	Sudut voltan pada bas
α	Sudut beban
F	Pengawal amplitud carian
P_{awal}	Populasi percubaan permulaan
P_i	Populasi percubaan semasa
J	Fungsi objektif
N	Jumlah bilangan bas
x	Pembolehubah keadaan
u	Pembolehubah kawalan
g	Fungsi kekangan kesaksamaan
h	Fungsi kekangan ketaksamaan

G	Unsur nyata matriks admitans
B	Unsur khayalan matriks admitans
P _{PT}	Kuasa aktif penjana teragih
PV	Profil voltan sistem
C _i ^f	Kos pelaburan penjana teragih
C _i ^g	Kos operasi penjana teragih
K	Jumlah bilangan bas dengan penjana teragih
w ₁ , w ₂	Faktor pemberat fungsi objektif
f _{kuasa}	Pekali songsangan kehilangan kuasa kes asas
f _{kos}	Pekali songsangan kos penjana teragih kes asas

SENARAI SINGKATAN

ACJ	Algoritma Carian Jejak-balik
AG	Algoritma Genetik
AT	Arus terus
AU	Arus ulangalik
CIGRE	International Council on Large Electricity Systems
EPRI	Electric Power Research Institute
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKKM	Indeks Kestabilan Kuasa Maksima
IKPK	Indeks Kestabilan Pemindahan Kuasa
IPV	Indeks Profil Voltan
IPPV	Indeks Peningkatan Profil Voltan
IRKV	Indeks Ramalan Keruntuhan Voltan
PKZ	Pengoptimuman Kerumun Zarah
PT	Penjana teragih
rndn	Random normal
TKH	Tergabung kuasa haba

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG KAJIAN

Perkembangan pesat dalam sektor industri elektrik mendesak pihak utiliti giat berusaha mempertingkatkan keupayaan sistem untuk mengatasi masalah permintaan beban yang tinggi. Peningkatan berterusan permintaan beban membuatkan sistem kuasa beroperasi menghampiri titik kritikal pengoperasian. Penambahbaikan mekanisme kawalan dan pengoperasian, pemerkasaan undang-undang, pemeriksaan dan penyelenggaraan alatan secara berjadual adalah antara langkah pencegahan yang telah diambil oleh pihak utiliti untuk menjamin kesinambungan bekalan kuasa kepada pihak pengguna. Namun begitu, kadangkala berlaku juga gangguan dalam sistem penghantaran terutamanya pada waktu puncak apabila berlaku permintaan kuasa yang terlalu tinggi. Masalah ini telah mendorong pelbagai pihak untuk memikirkan langkah penyelesaian panjang yang bersifat praktikal serta fleksibel. Salah satu strategi penyelesaian adalah dengan menjana tenaga elektrik berhampiran dengan zon pengguna. Konsep ini telah menarik perhatian ramai dan merangsang minat terhadap penggunaan teknologi penjanaan teragih sebagai pilihan utama dalam penjanaan kuasa elektrik di masa hadapan.

Penjanaan teragih dalam sistem kuasa semakin mendapat perhatian kerana teknologi ini boleh membawa manfaat kepada kedua-dua pihak utiliti dan juga pengguna. Penggunaan teknologi ini semakin diminati kerana ia mendatangkan pelbagai keuntungan dari aspek teknikal, ekonomi mahupun alam sekitar. Penjana teragih sesuai digunakan untuk memenuhi permintaan kuasa yang meningkat di waktu puncak kerana kuasa keluarannya mudah dikawal melalui pengurusan unit-unit modul

yang bersaiz kecil. Penjana teragih turut boleh memberi beberapa manfaat lain kepada utiliti dengan menyediakan sokongan voltan, meningkatkan keselamatan dan mengurangkan kehilangan kuasa. Sementara itu dari sudut pengguna, penjana teragih dapat memberi manfaat dengan menyediakan kuasa sandaran ketika berlaku gangguan kuasa dan memberikan faedah kewangan bagi kuasa tambahan yang dihasilkan. Pada masa kini terdapat pelbagai teknologi penjana teragih di pasaran. Pada asasnya, teknologi ini terbahagi kepada dua jenis, iaitu, teknologi berasaskan sumber tenaga keterbaharuan dan teknologi berasaskan sumber tenaga fosil. Penjana teragih berasaskan tenaga keterbaharuan adalah seperti fotovoltan, turbin angin dan biojisim manakala penjana teragih fosil adalah seperti enjin diesel, turbin mikro dan penjana tergabung kuasa haba.

Kebolehpercayaan dan kestabilan adalah antara parameter penting yang sering diberikan keutamaan dalam sistem kuasa. Dengan kebolehpercayaan, ini bermakna sesebuah sistem itu mempunyai simpanan tenaga elektrik yang mencukupi untuk menampung perubahan permintaan tenaga manakala kestabilan sistem bermaksud bahawa apabila berlaku gangguan kuasa, sistem berkeupayaan untuk pulih pada keadaan asalnya dengan mengekalkan kualiti perkhidmatan yang sama. Penggunaan penjana teragih memainkan peranan penting dan dijangka boleh beri manfaat dari aspek kebolehpercayaan, kestabilan, keselamatan dan kecekapan sistem kuasa elektrik (EU Task Force Smart Grid 2010). Di sebalik manfaat yang ditawarkan, penyambungan penjana teragih ke dalam sistem kuasa sedia ada boleh menyebabkan perubahan ke atas ciri teknikal rangkaian yang boleh mendatangkan masalah (Hemdan et al. 2009). Bagi memastikan penyambungan unit penjana teragih menghasilkan manfaat yang diharapkan, penentuan lokasi dan kapasiti optimum bagi penjana teragih adalah penting. Lokasi dan saiz penjanaan teragih yang optimum boleh memberi manfaat teknikal dan juga ekonomi kepada utiliti dengan meminimumkan kehilangan kuasa, meningkatkan kestabilan, meningkatkan kebolehpercayaan serta mengurangkan kos operasi dan penyelenggaraan (Ackermann et al. 2001; El-Khattam & Salama 2004; Peperman et al. 2005).

1.2 PENYATAAN MASALAH KAJIAN

Pada masa kini, sektor industri bekalan elektrik sedang berhadapan dengan peningkatan pesat dalam permintaan tenaga elektrik dan senario ini dijangka berterusan pada masa akan datang. Sekiranya masalah ini tidak diatasi dengan segera, ia boleh menjelaskan kestabilan dan keselamatan sistem kuasa. Operasian sistem kuasa sering dikaitkan dengan masalah kehilangan kuasa yang tinggi disebabkan faktor rintangan dalam talian (Acharya et al. 2006) dan juga kedudukan beban yang jauh dari pusat penjanaan (Moghavemmi & Faruque 2002). Selain itu, isu ketakstabilan voltan (Li et al. 2009; Gil et al. 2009; Ettehadi et al. 2013) dan pemindahan kuasa rangkaian (Tran-Quoc et al. 2006) juga sering diberi perhatian.

Kajian prestasi sistem elektrik menunjukkan penggunaan teknologi penjanaan teragih membantu menyelesaikan beberapa masalah berkaitan pengoperasian seperti pengurangan kehilangan kuasa (Hedayati et al. 2008; Ghosh et al. 2010), peningkatan kestabilan sistem (Gil et al. 2009; Abou-Mouti & El-Hawary 2011; Ettehadi et al. 2013; Al-Abri et al. 2013), pengurangan kos operasi (Sheng et al. 2013), peningkatan keupayaan tanggung beban (Juanuwattanakul & Masoum 2012) dan peningkatan kebolehpercayaan bekalan elektrik (Nekoeei et al. 2013). Namun, dengan kadar penembusan penjana teragih yang tinggi, jelas ini akan memberi impak ke atas operasian dan kawalan sistem kuasa. Oleh itu, adalah penting untuk mengkaji kesan peningkatan penggunaan penjana teragih ke atas kestabilan voltan dalam sistem pengagihan dan juga mengkaji bagaimana untuk mengurangkan kesan negatif tersebut. Kajian penentuan saiz dan lokasi yang optimum bagi penjana teragih turut menjadi penting untuk mendapatkan kesan positif penjana teragih. Analisis pengoptimuman melibatkan permodelan matematik yang kompleks dan biasanya digunakan kaedah penyelesaian secara lelaran atau iteratif. Pemilihan fungsi objektif dan kekangan adalah penting untuk menentukan keberkesanan model pengoptimuman yang dicadangkan.

Berdasarkan kajian penentuan saiz dan lokasi penjana teragih yang optimum, beberapa penyelidik telah menggunakan kaedah penyelesaian konvensional seperti pengaturcaraan tak lurus integer bercampur (Borges & Falcao 2006; Kumar & Gao

2010), titik dalaman primal dual (Khoa et al. 2006) dan pengaturcaraan Newton-Raphson (Ghosh et al. 2010). Namun pengoptimuman kaedah konvensional didapati tidak dapat menghasilkan keputusan yang baik bagi fungsi objektif yang mempunyai ciri tak selanjar. Pengoptimuman heuristik yang mengadaptasi ciri pencarian rawak dikenalpasti dapat mengatasi kekurangan teknik konvensional. Kaedah pengoptimuman heuristik yang sering digunakan dalam penentuan saiz dan penempatan optimum penjana teragih adalah algoritma genetik (Sedighizadeh & Rezazadeh 2008; Kotb et al. 2010; Abou El-Ela 2010) dan teknik pengoptimuman kerumun zarah (Krueasuk & Ongsakul 2006; Ardakani et al. 2007; Lalitha et al. 2010; Bhumkittipich & Phuangpormpitak 2013). Kaedah pengoptimuman heuristik ini turut mempunyai kelemahan yang mana algoritma genetik memerlukan bilangan parameter yang banyak, mengambil masa lelaran yang panjang dan memberikan penyelesaian yang tidak konsisten (Dey et al. 2010). Manakala teknik pengoptimuman kerumun zarah pula dikesan mudah mengalami keadaan separa optimum. Keadaan ini menyebabkan pergerakan zarah yang tidak selanjar dan ia menjelaskan ketepatan keputusan (Bai 2010). Oleh itu, pembentukan sebuah model pengoptimuman dengan fungsi objektif yang padat serta dapat menilai kesan teknikal mahupun ekonomi perlu dibangunkan supaya penempatan penjana teragih dalam rangkaian pengagihan dapat membawa manfaat yang lebih baik. Selain itu, teknik pengoptimuman heuristik yang stabil dan cekap juga perlu dibangunkan untuk memberikan keputusan yang konsisten dan tepat.

1.3 OBJEKTIF DAN SKOP KAJIAN

Dalam sistem kuasa, mengekalkan persekitaran operasi yang stabil dan selamat telah menjadi keutamaan. Isu kestabilan voltan dalam rangkaian pengagihan dengan kehadiran unit penjana teragih merupakan permasalahan yang masih kurang dikaji. Justeru, kajian ini memfokus kepada pembangunan teknik baru dalam penentuan saiz dan penempatan optimum bagi penjana teragih yang disambung ke dalam dua jenis sistem kuasa, iaitu, sistem jejari dan sistem jejaring.

Bagi mencapai tujuan ini, beberapa objektif kajian telah diuraikan seperti berikut:

- i. Untuk membangunkan indeks kestabilan voltan baru yang boleh menilai kestabilan voltan dalam sistem kuasa dengan cepat dan tepat.
- ii. Untuk membangunkan fungsi objektif pengoptimuman yang berkesan dengan mempertimbangkan kestabilan voltan, kehilangan kuasa dan kos penjanaan teragih dalam penentuan saiz dan penempatan penjana teragih yang optimum.
- iii. Untuk membangunkan algoritma pengoptimuman heuristik baru yang dapat menghasilkan keputusan dengan lebih pantas dan konsisten.

Tumpuan penyelidikan ini adalah berkaitan dengan penempatan dan pensaizan optimum penjana teragih bagi tujuan meningkatkan manfaat yang boleh diperolehi dari penyepaduannya ke dalam sistem kuasa. Untuk merumuskan permasalahan pengoptimuman bagi menentukan penempatan optimum penjana teragih, pada mulanya dua fungsi objektif tunggal telah dipertimbangkan dengan meminimumkan indeks kestabilan bagi penempatan dan jumlah kehilangan kuasa dalam talian untuk pensaizan. Seterusnya, dipertimbangkan rumusan permasalahan pengoptimuman dengan fungsi objektif berbilang dengan mengambilkira kedua-dua faktor indeks kestabilan voltan dan kehilangan kuasa secara serentak. Kedudukan dan saiz penjana teragih yang optimum ditentukan melalui kaedah indeks pemberat (*weighted*). Untuk menghasilkan keputusan yang lebih komprehensif dari sudut ekonomi, rumusan pengoptimuman berbilang yang dicadangkan juga mempertimbangkan kos penjana teragih.

Untuk menyelesaikan permasalahan pengoptimuman ini, Algoritma Carian Jejak-balik (ACJ) yang merupakan satu teknik pengoptimuman heuristik berdasarkan algoritma evolusi yang agak baru telah digunakan dalam kajian ini. Pengesahan algoritma pengoptimuman yang dibangunkan telah diuji ke atas dua struktur sistem ujian, iaitu, sistem jejaring bersaiz sederhana IEEE 30-bas dan sistem jejari bersaiz besar 69-bas.

1.4 RANGKA TESIS

Tesis ini dirangkakan dalam beberapa bab seperti berikutnya. Bab I mengemukakan gambaran ringkas mengenai latar belakang kajian dan

kepentingan keselamatan dan kestabilan operasian sistem kuasa terhadap peningkatan permintaan beban. Penggunaan penjanaan teragih dalam rangkaian pengagihan dijangka dapat memberi manfaat dan kesan yang positif terhadap prestasi sistem dari aspek kestabilan, kebolehpercayaan dan kehilangan kuasa sekiranya penempatan dan saiz penjana teragih yang optimum dapat dipastikan. Objektif kajian serta rangka kerja tesis juga dibincangkan dalam bab ini.

Bab II memberikan gambaran secara ringkas tentang sistem pengagihan di samping perbincangan lanjut kesan penjanaan teragih ke atas kestabilan voltan. Bab ini mengulas tentang kerja-kerja penyelidikan yang telah dilakukan berkaitan dengan kestabilan voltan dan juga teknik-teknik pengoptimuman penjana teragih. Pelbagai kajian-kajian pengoptimuman terdahulu yang menggunakan kaedah konvensional dan heuristik untuk penentuan tempat dan saiz penjana teragih yang optimum juga dibincangkan.

Bab III menghuraikan konsep dan rumusan indeks kestabilan voltan baru yang dinamakan indeks kestabilan kuasa maksimum. Penerangan diberikan tentang tiga konsep teras yang digunakan dalam pembentukan indeks ini, iaitu, merangkumi konsep litar setaraan ringkas, kestabilan voltan dan pemindahan kuasa maksimum. Indeks ini digunakan untuk mengenal pasti nod yang lemah dan menghampiri titik keruntuhan voltan semasa operasi beban lampau.

Bab IV menerangkan rumusan permasalahan pengoptimuman yang dibangunkan untuk menyelesaikan penempatan dan pensaizan optimum unit penjana teragih dalam sistem kuasa. Gabungan rumusan kehilangan kuasa, indeks kestabilan voltan dan fungsi kos penjana teragih membentuk fungsi objektif dalam model pengoptimuman yang baru. Bab ini juga membincangkan latar belakang teknik pengoptimuman yang diperkenalkan bagi menghasilkan keputusan yang berciri optimum sejagat dengan lebih tepat dan cepat. Teknik penyelesaian heuristik yang baru, iaitu, ACJ telah digunakan untuk mencari penyelesaian permasalahan pengoptimuman ini.

Bab V membincangkan hasil ujian teknik pengoptimuman yang dicadangkan ke atas sistem ujian IEEE 30-bas dan 69-bas. Hasil ujian dianalisis dan dibincangkan untuk

mengesahkan keberkesanan teknik pengoptimuman yang dibangunkan. Bab ini juga membincangkan keputusan analisis kestabilan voltan yang dilakukan ke atas sistem ujian IEEE 30-bas dan 69-bas dengan menggunakan indeks kestabilan kuasa maksimum. Kajian perbandingan tutut dilakukan untuk menilai keberkesanan indeks kestabilan kuasa maksimum dan teknik pengoptimuman heuristik yang dicadangkan.

Bab VI memperihalkan tentang rumusan dan sumbangan yang dibuat dalam kajian ini. Bab ini juga memberikan beberapa cadangan untuk kerja-kerja lanjutan yang boleh dibuat kajian di masa depan.

BAB II

TINJAUAN KEPUSTAKAAN

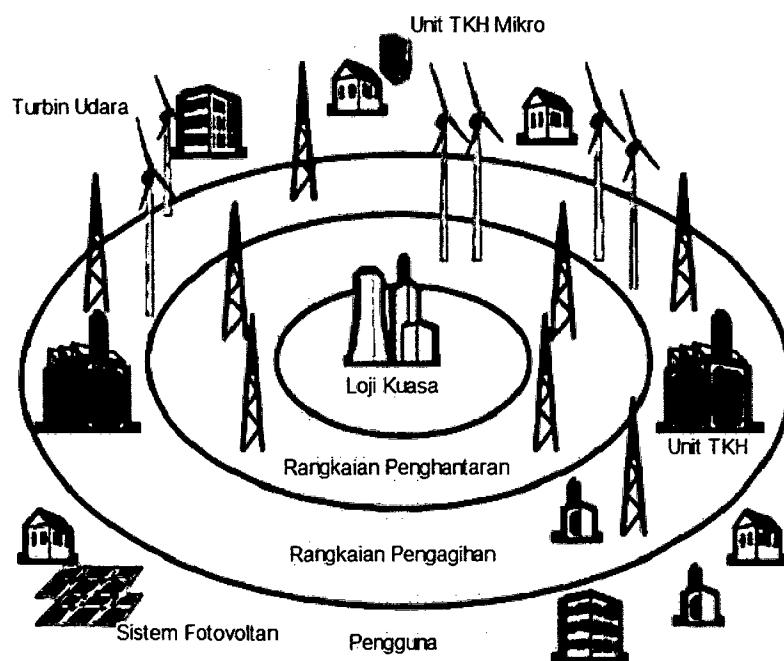
2.1 PENGENALAN

Bab ini dimulakan dengan perihal ringkas Penjana Teragih (PT) dan peranannya dalam sistem elektrik kuasa. Ia disusuli dengan tinjauan kesan penggunaan PT terhadap operasian sistem kuasa seperti kestabilan voltan, kehilangan kuasa dan kos operasi sistem. Maklumat lanjut tentang analisis kestabilan voltan dan kajian kestabilan voltan dalam sistem kuasa turut diuraikan. Seterusnya bab ini membincangkan tentang kepentingan menentukan kedudukan dan saiz optimum penjana teragih dalam sistem kuasa. Tinjauan kepustakaan juga dibuat tentang aplikasi teknik pengoptimuman yang digunakan oleh penyelidik terdahulu meliputi kaedah konvensional dan kaedah kepintaran buatan.

2.2 PENJANA TERAGIH DALAM SISTEM KUASA

Sistem kuasa elektrik adalah sebuah sistem yang sangat besar, mempunyai rekabentuk tertentu dan pengoperasian yang rumit. Utiliti kuasa menjana dan menghantar elektrik melalui rangkaian talian penghantaran dan pengagihan. Dalam industri tenaga elektrik, peranan sistem pengagihan kuasa adalah untuk menghantar tenaga dari pusat bekalan kuasa pukal ke pengguna. Tiga fungsi asas sistem pengagihan adalah sistem mesti mempunyai kapasiti yang mencukupi untuk memenuhi permintaan beban puncak dan kebolehpercayaan bekalan perlu dikekalkan pada tahap yang tinggi (Willis 2004). Sistem pengagihan berkait rapat dengan PT oleh kerana PT yang mempunyai penjanaan kuasa kecil menjana tenaga berhampiran dengan pusat pengguna dan

biasanya disambung dalam sistem pengagihan kuasa. Konsep PT telah diperkenalkan beberapa dekad lalu, namun sejak akhir ini penggunaannya semakin mendapat sambutan yang meluas disebabkan oleh peningkatan permintaan kuasa pelanggan, kemajuan teknologi, tekanan ekonomi dan kesedaran tentang kesan alam sekitar. Perkembangan dalam teknologi PT telah mencetus perubahan ke atas sistem pengagihan konvensional yang mana pada asalnya, aliran arus dalam talian adalah satu arah dan mengalir dari paras voltan tinggi ke paras voltan rendah. Namun dengan kehadiran PT, arus dalam talian kini berpotensi mengalir dalam arah yang bertentangan. Kehadiran PT telah membawa perubahan ke atas struktur asal sistem kuasa seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.1.



Rajah 2.1 Sistem kuasa elektrik dengan penjana teragih

Sumber: Pielke dan Kurat et al. 2008

2.2.1 Takrifan Penjana Teragih

Ringkasnya, PT boleh ditakrifkan sebagai unit penjanaan berskala kecil yang disambung pada rangkaian pengagihan kuasa. Terdapat pelbagai istilah yang digunakan untuk menggambarkan penjanaan tenaga elektrik secara teragih. Electric

Power Research Institute (EPRI) memberi takrifan PT sebagai unit penjana elektrik bersaiz kecil kurang dari 5 MW yang dibina berhampiran dengan pusat beban (Goodman 1998).

Mengikut takrifan oleh International Council on Large Electricity Systems (CIGRE), PT adalah unit penjanaan dengan kapasiti maksimum di antara 50 MW hingga 100 MW dan biasanya disambungkan pada rangkaian pengagihan (CIGRE 1998). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) pula mendefinisikan PT sebagai penjanaan tenaga elektrik oleh sistem yang berskala kecil supaya penjanaan dapat dilakukan hampir di setiap tempat dalam sistem kuasa (Pepermans et al. 2005). Seterusnya, International Energy Agency (IEA) menjelaskan bahawa PT adalah unit yang menghasilkan kuasa di kawasan pengguna atau dalam rangkaian pengagihan (IEA 2002). Perbezaan pentakrifian PT adalah berdasarkan tujuan penggunaan, kapasiti, penempatan, ragam operasi dan juga teknologi PT. Walau bagaimanapun, takrifan PT yang kerap digunakan dalam banyak laporan kajian adalah sebagai sumber elektrik yang disambungkan terus ke rangkaian pengagihan atau di sebelah meter pengguna (Ackermann et al. 2001). Namun takrifan ini tidak menerangkan secara jelas tentang saiz PT sebaliknya hanya mentakrifkannya sebagai unit penjanaan elektrik yang kecil. Jadual 2.1 menunjukkan pengelasan PT mengikut saiz atau kapasitinya.

Jadual 2.1 Kategori PT mengikut saiz

Sumber: Ackermann et al. 2001

Jenis	Saiz
Penjana teragih mikro	1 Watt to 5 kW
Penjana teragih kecil	5 kW to 5 MW
Penjana teragih sederhana	5 MW to 50 MW
Penjana teragih besar	Melebihi 50 MW

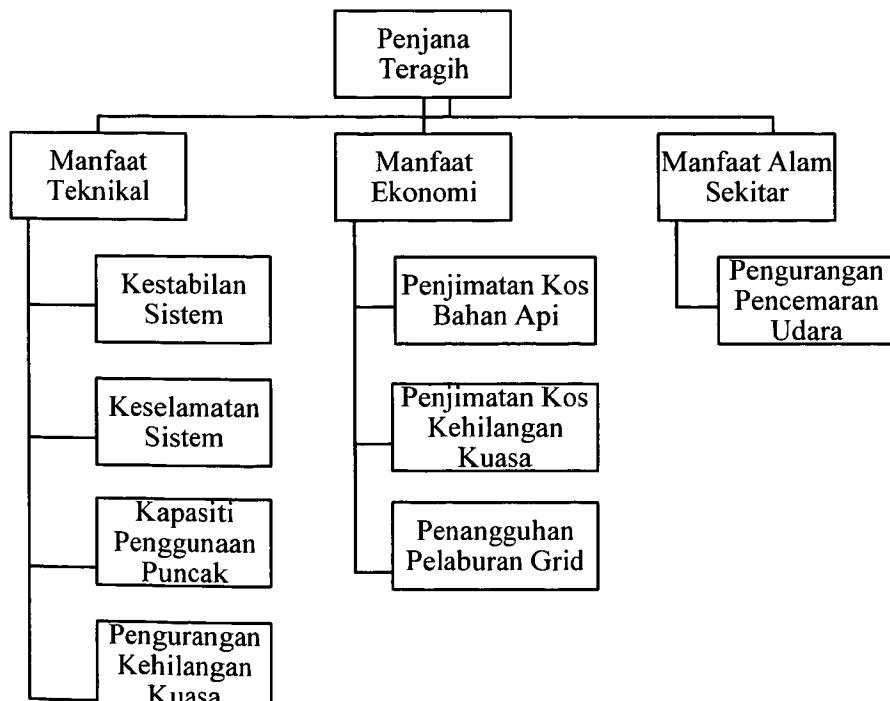
2.2.2 Kelebihan Penjana Teragih

Penjana teragih menawarkan beberapa manfaat yang tidak diperolehi dari penjanaan elektrik berpusat (Chiradeja & Ramakumar 2004; Momoh et al 2008; Waseem et al

2009). Teknologi ini boleh memberi pelbagai manfaat sama ada dari aspek teknikal, ekonomi mahupun alam sekitar. Manfaat utama yang boleh diperolehi daripada teknologi PT adalah seperti diuraikan berikutnya (Cameron & Smallwood 2002):

- i. PT menjana kuasa berhampiran dengan pengguna dan dengan cara ini kehilangan kuasa dalam rangkaian penghantaran dan pengagihan dapat dikurangkan.
- ii. PT boleh meningkatkan keselamatan dan kebolehpercayaan sistem dengan menambah kapasiti penjanaan, mengurangkan kesesakan dalam sistem penghantaran dan menyediakan kuasa sandaran ketika berlaku gangguan bekalan kuasa.
- iii. PT boleh memberi sokongan dalam keadaan permintaan beban puncak dengan membekalkan kuasa ke beban.
- iv. PT dapat mengurangkan kos utiliti dengan menangguhkan keperluan pelaburan menaik taraf sistem penghantaran dan pengagihan.

Manfaat yang dapat diperolehi dari PT adalah seperti diringkaskan dalam Rajah 2.2.



Rajah 2.2 Manfaat penjana teragih

Sumber: Azmy 2005

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG KAJIAN

Perkembangan pesat dalam sektor industri elektrik mendesak pihak utiliti giat berusaha mempertingkatkan keupayaan sistem untuk mengatasi masalah permintaan beban yang tinggi. Peningkatan berterusan permintaan beban membuatkan sistem kuasa beroperasi menghampiri titik kritikal pengoperasian. Penambahbaikan mekanisme kawalan dan pengoperasian, pemerkasaan undang-undang, pemeriksaan dan penyelenggaraan alatan secara berjadual adalah antara langkah pencegahan yang telah diambil oleh pihak utiliti untuk menjamin kesinambungan bekalan kuasa kepada pihak pengguna. Namun begitu, kadangkala berlaku juga gangguan dalam sistem penghantaran terutamanya pada waktu puncak apabila berlaku permintaan kuasa yang terlalu tinggi. Masalah ini telah mendorong pelbagai pihak untuk memikirkan langkah penyelesaian panjang yang bersifat praktikal serta fleksibel. Salah satu strategi penyelesaian adalah dengan menjana tenaga elektrik berhampiran dengan zon pengguna. Konsep ini telah menarik perhatian ramai dan merangsang minat terhadap penggunaan teknologi penjanaan teragih sebagai pilihan utama dalam penjanaan kuasa elektrik di masa hadapan.

Penjanaan teragih dalam sistem kuasa semakin mendapat perhatian kerana teknologi ini boleh membawa manfaat kepada kedua-dua pihak utiliti dan juga pengguna. Penggunaan teknologi ini semakin diminati kerana ia mendatangkan pelbagai keuntungan dari aspek teknikal, ekonomi mahupun alam sekitar. Penjana teragih sesuai digunakan untuk memenuhi permintaan kuasa yang meningkat di waktu puncak kerana kuasa keluarannya mudah dikawal melalui pengurusan unit-unit modul

yang bersaiz kecil. Penjana teragih turut boleh memberi beberapa manfaat lain kepada utiliti dengan menyediakan sokongan voltan, meningkatkan keselamatan dan mengurangkan kehilangan kuasa. Sementara itu dari sudut pengguna, penjana teragih dapat memberi manfaat dengan menyediakan kuasa sandaran ketika berlaku gangguan kuasa dan memberikan faedah kewangan bagi kuasa tambahan yang dihasilkan. Pada masa kini terdapat pelbagai teknologi penjana teragih di pasaran. Pada asasnya, teknologi ini terbahagi kepada dua jenis, iaitu, teknologi berasaskan sumber tenaga keterbaharuan dan teknologi berasaskan sumber tenaga fosil. Penjana teragih berasaskan tenaga keterbaharuan adalah seperti fotovoltan, turbin angin dan biojisim manakala penjana teragih fosil adalah seperti enjin diesel, turbin mikro dan penjana tergabung kuasa haba.

Kebolehpercayaan dan kestabilan adalah antara parameter penting yang sering diberikan keutamaan dalam sistem kuasa. Dengan kebolehpercayaan, ini bermakna sesebuah sistem itu mempunyai simpanan tenaga elektrik yang mencukupi untuk menampung perubahan permintaan tenaga manakala kestabilan sistem bermaksud bahawa apabila berlaku gangguan kuasa, sistem berkeupayaan untuk pulih pada keadaan asalnya dengan mengekalkan kualiti perkhidmatan yang sama. Penggunaan penjana teragih memainkan peranan penting dan dijangka boleh beri manfaat dari aspek kebolehpercayaan, kestabilan, keselamatan dan kecekapan sistem kuasa elektrik (EU Task Force Smart Grid 2010). Di sebalik manfaat yang ditawarkan, penyambungan penjana teragih ke dalam sistem kuasa sedia ada boleh menyebabkan perubahan ke atas ciri teknikal rangkaian yang boleh mendatangkan masalah (Hemdan et al. 2009). Bagi memastikan penyambungan unit penjana teragih menghasilkan manfaat yang diharapkan, penentuan lokasi dan kapasiti optimum bagi penjana teragih adalah penting. Lokasi dan saiz penjanaan teragih yang optimum boleh memberi manfaat teknikal dan juga ekonomi kepada utiliti dengan meminimumkan kehilangan kuasa, meningkatkan kestabilan, meningkatkan kebolehpercayaan serta mengurangkan kos operasi dan penyelenggaraan (Ackermann et al. 2001; El-Khattam & Salama 2004; Peperman et al. 2005).

1.2 PENYATAAN MASALAH KAJIAN

Pada masa kini, sektor industri bekalan elektrik sedang berhadapan dengan peningkatan pesat dalam permintaan tenaga elektrik dan senario ini dijangka berterusan pada masa akan datang. Sekiranya masalah ini tidak diatasi dengan segera, ia boleh menjelaskan kestabilan dan keselamatan sistem kuasa. Operasian sistem kuasa sering dikaitkan dengan masalah kehilangan kuasa yang tinggi disebabkan faktor rintangan dalam talian (Acharya et al. 2006) dan juga kedudukan beban yang jauh dari pusat penjanaan (Moghavemmi & Faruque 2002). Selain itu, isu ketakstabilan voltan (Li et al. 2009; Gil et al. 2009; Ettehadi et al. 2013) dan pemindahan kuasa rangkaian (Tran-Quoc et al. 2006) juga sering diberi perhatian.

Kajian prestasi sistem elektrik menunjukkan penggunaan teknologi penjanaan teragih membantu menyelesaikan beberapa masalah berkaitan pengoperasian seperti pengurangan kehilangan kuasa (Hedayati et al. 2008; Ghosh et al. 2010), peningkatan kestabilan sistem (Gil et al. 2009; Abou-Mouti & El-Hawary 2011; Ettehadi et al. 2013; Al-Abri et al. 2013), pengurangan kos operasi (Sheng et al. 2013), peningkatan keupayaan tanggung beban (Juanuwattanakul & Masoum 2012) dan peningkatan kebolehpercayaan bekalan elektrik (Nekoeei et al. 2013). Namun, dengan kadar penembusan penjana teragih yang tinggi, jelas ini akan memberi impak ke atas operasian dan kawalan sistem kuasa. Oleh itu, adalah penting untuk mengkaji kesan peningkatan penggunaan penjana teragih ke atas kestabilan voltan dalam sistem pengagihan dan juga mengkaji bagaimana untuk mengurangkan kesan negatif tersebut. Kajian penentuan saiz dan lokasi yang optimum bagi penjana teragih turut menjadi penting untuk mendapatkan kesan positif penjana teragih. Analisis pengoptimuman melibatkan permodelan matematik yang kompleks dan biasanya digunakan kaedah penyelesaian secara lelaran atau iteratif. Pemilihan fungsi objektif dan kekangan adalah penting untuk menentukan keberkesanan model pengoptimuman yang dicadangkan.

Berdasarkan kajian penentuan saiz dan lokasi penjana teragih yang optimum, beberapa penyelidik telah menggunakan kaedah penyelesaian konvensional seperti pengaturcaraan tak lurus integer bercampur (Borges & Falcao 2006; Kumar & Gao

BAB III

PEMBANGUNAN INDEKS KESTABILAN VOLTAN

3.1 PENGENALAN

Salah satu kaedah untuk menilai kestabilan voltan dalam sistem kuasa adalah dengan membangunkan indeks kestabilan voltan yang berkesan dan cekap. Melalui penggunaan indeks ini, pengendali sistem kuasa boleh mengukur sejauh mana tahap kestabilan sistem dari fenomena keruntuhan voltan supaya langkah kawalan sewajarnya dapat diambil. Oleh itu, indeks petunjuk kestabilan voltan telah memainkan peranan penting sebagai langkah berjaga-jaga untuk mengelakkan ketakstabilan voltan dalam sistem kuasa. Bab ini memperihalkan beberapa indeks kestabilan voltan yang telah dibangunkan dan juga menerbitkan indeks kestabilan voltan yang baru untuk digunakan dalam penempatan dan pensaizan optimum penjana teragih.

3.2 ANALISIS ALIRAN KUASA DAN KESTABILAN VOLTAN

Analisis aliran kuasa merupakan analisis yang sering digunakan untuk menganggar kestabilan voltan berdasarkan model keadaan mantap. Analisis aliran kuasa atau juga dikenali sebagai analisis aliran beban melibatkan pengiraan aliran kuasa dan voltan bas dalam sistem kuasa yang tertentu. Dalam analisis aliran kuasa, pada setiap bas terdapat empat parameter penting, iaitu, kuasa aktif P , kuasa reaktif Q , magnitud voltan V dan sudut voltan θ . Berdasarkan hukum arus Kirchoff, hubungan antara voltan dan arus bas diwakili oleh persamaan nod seperti berikut,

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{\text{bas}} \cdot \mathbf{V} \quad (3.1)$$

yang mana,

\mathbf{Y}_{bas} : matriks admitans bas

\mathbf{V} : voltan nod

Pada bas k , arus yang mengalir pada bas tersebut diberikan oleh,

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n; \quad k, n = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

Kuasa ketara, S_k pada bas k adalah,

$$S_k = V_k I_k^* = P_k + jQ_k \quad (3.3)$$

Dari (3.3), arus yang mengalir dalam bas k diberikan oleh

$$I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_k} \quad (3.4)$$

yang mana,

P_k : kuasa aktif atau nyata

Q_k : kuasa reaktif

V_k : magnitud voltan

Gantikan (3.2) ke dalam (3.3), didapati,

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (3.5)$$

Dari (3.5), didapati hubungan antara pembolehubah P , Q dan V adalah tak lelurus. Untuk menyelesaikan persamaan tak lelurus ini, teknik lelaran seperti Newton-Raphson sering digunakan untuk menerbitkan persamaan aliran kuasa lelurus yang dirumuskan seperti berikut (Gao et al. 1992):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

yang mana,

$[J]$: matriks terbitan separa atau matriks Jacobian

ΔP : perbezaan kuasa aktif

- ΔQ : perbezaan kuasa reaktif
- $\Delta \delta$: perbezaan sudut voltan
- ΔV : perbezaan magnitud voltan

Penyelesaian aliran kuasa menggunakan kaedah Newton-Raphson adalah untuk menentukan magnitud dan sudut voltan pada setiap bas. Magnitud dan sudut voltan yang perlu dikira diberikan nilai anggaran 1 per unit bagi magnitud voltan dan 0 bagi sudut voltan. Nilai kuasa aktif dan reaktif dikira dan matriks Jacobian dibentuk pada setiap lelaran. Pengiraan magnitud dan sudut voltan dikira dengan menggunakan matriks Jacobian tersongsang. Proses ini berterusan sehingga beza nilai pembolehubah menepati jidar toleransi yang ditetapkan.

Dalam kes ketakstabilan voltan, proses penyelesaian yang sama diikuti sehingga berlaku perubahan dalam tingkah-laku penyelesaian apabila sistem menghampiri titik keruntuhan voltan, ia dikenali sebagai titik pencabangan. Pada titik pencabangan, nilai eigen nyata matriks Jacobian bagi aliran beban menjadi sifar dan menyebabkan matriks Jacobian menjadi tunggal (*singular*). Di dalam menilai kestabilan voltan, penentuan nilai tunggal bagi matriks Jacobian memainkan peranan penting kerana nilai ini membawa maksud keruntuhan voltan. Fungsi matriks Jacobian sangat berguna dalam sistem kuasa kerana ianya memberikan maklumat tentang kestabilan voltan. Titik keruntuhan voltan yang diketahui melalui matriks Jacobian juga sebenarnya memberi perihal muatan beban maksima (*loadability*) yang mampu diterima oleh sesebuah bas.

Umumnya, petunjuk kestabilan voltan berasaskan aliran kuasa boleh dikategorikan kepada dua kumpulan (Karbalaie et al. 2010):

- i. Petunjuk kestabilan voltan berasaskan matriks Jacobian.
- ii. Petunjuk kestabilan voltan berasaskan pembolehubah sistem.

Fungsi analisis kestabilan voltan berasaskan matriks Jacobian untuk mengira had maksimum keupayaan beban dan juga menentukan jidar kestabilan voltan. Sebagai contoh, analisis menggunakan lengkung P-V atau lengkung Q-V dan lazimnya analisis sebegini mengambil masa yang panjang. Sementara itu bagi analisis kestabilan voltan