

Integrasi Optimal *Distributed Generator* untuk Meningkatkan Performasi Sistem dengan Teknik Optimasi Evolusi

I Made Wartana¹, Teguh Herbasuki², Ni Putu Agustini³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, ITN-Malang

e-mail: ¹m.wartana@fti.itn.ac.id; ²teguh.herbasuki@yahoo.com, ³niputu.agustini@yahoo.co.id

ABSTRAK

Integrasi optimal berbagai teknologi *Distributed Generation* (DG) dalam jaringan distribusi telah menjadi salah satu perhatian utama bagi manajemen insinyur profesional dalam beberapa tahun terakhir. Di antara banyak jenis DG, turbin angin adalah salah satu jenis DG yang dialokasikan secara optimal dalam jaringan listrik pada makalah ini untuk meningkatkan kinerja jaringan. Sebuah varian baru dari Algoritma Genetika (GA) khusus dalam masalah optimasi multi-tujuan yang dikenal sebagai *Non-didominasi Sorting Algoritma Genetika II* (NSGA-II) telah diusulkan untuk mencapai tujuan tersebut. Untuk membantu pembuat keputusan memilih solusi kompromi terbaik dari *Pareto front*, mekanisme berbasis fussyzy digunakan dalam penelitian ini. NSGA-II digunakan untuk mendapatkan lokasi dan ukuran DG yang optimal dalam bus beban sistem yang sesuai. Fungsi multi-tujuan dinyatakan sebagai indeks kinerja sistem yaitu: maksimalisasi pembebanan sistem dalam marjin keamanan dan stabilitas sistem yaitu batas tegangan dan saluran sementara minimalisasi rugi daya nyata dari saluran transmisi. Studi simulasi dilakukan pada modifikasi IEEE sistem 14-bus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja dinamis dari sistem daya dapat secara efektif ditingkatkan dengan alokasi optimal dan ukuran DG.

Kata kunci: Indeks stabilitas tegangan, faktor stabilitas saluran, FACTS, SVC, *stabilitas* dan *kamanan sistem*

ABSTRACT

Optimal integration of a wide variety of Distributed Generation (DG) technology in distribution networks has become one of the major management concerns for professional engineers in recent years. Among many types of the DG, Wind Turbine is one type of the DG which is optimally allocated in a power network in this paper for improving the performance of the network. A new variant of Genetic Algorithm (GA) specialized in multi-objective optimizations problem known as Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) have been proposed for accomplishing the same. To aid the decision maker choosing the best compromise solutions from the Pareto front, the fuzzy-based mechanism is employed for this task. NSGA-II is used to obtain the optimal location and sizing of the DG in a suitable load bus of the system. Multi-objective functions are considered as the indices of the system performance viz.: maximization of system loadability in system security and stability margin i.e. voltage and line limit whereas minimization of the real power loss of the transmission lines. Simulation studies are undertaken on modified IEEE 14-bus system. Results show that the dynamic performance of the power system can be effectively enhanced by the optimal allocation and sizing of the DG.

Keywords: DG, Multiobjective optimization, NSGA-II, Power System security margin, System loadability

Pendahuluan

Perkembangan mutakhir teknologi pembangkit energi baru terbarukan (*clean energy*) skala kecil yang mempunyai banyak jenis seperti : turbin angin, sel surya, sel bahan bakar, energi baterai, sistem penyimpanan, sistem kogenerasi, bahan bakar sel, biomassa, turbin mikro, pembangkit listrik tenaga air kecil dan sebagainya telah menarik perhatian perusahaan listrik. Hal ini dimungkinkan dengan melakukan perubahan dalam infrastruktur sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik serta kebijakan dengan mengintegrasikan pembangkit listrik tersebar yang sering dikenal dengan istilah *Distributed Generation* (DG) ke dalam sistem tenaga listrik (Atwa & El-Saadany, 2011). DG didefinisikan sebagai unit pembangkit skala kecil dengan kapasitas maksimum dari 50 MW sampai 100 MW yang biasanya terhubung ke jaringan distribusi (Ghosh, Ghoshal, & Ghosh, 2010). Unit DG tidak direncanakan penempatannya secara terpusat atau dikirim, selain keuntungannya, DG memiliki dampak yang besar pada aliran daya, perbaikan profil tegangan dan peningkatan stabilitas sistem tenaga yang kesemuanya ini akan meningkatkan performansi sistem tenaga listrik.

Banyak negara di berbagai belahan dunia menyatakan bahwa pengembangan dan aplikasi dari berbagai jenis DG sebagai pembangkit listrik mengalami perkembangan yang paling cepat. Beberapa manfaat teknis utama dari integrasi unit DG ke dalam grid adalah meningkatkan profil tegangan dengan mengurangi rugi daya nyata (P_{loss}) (Meegahapola, Abbott, Morrow, Littler, & Flynn, 2011), meningkatkan keamanan dan keandalan sistem untuk perbaikan kualitas daya, meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan (Talaat & Al-Ammar, 2011), meningkatkan kapasitas transmisi serta kongesti distribusi. Disamping itu, dengan terpasangnya unit DG di dekat pusat beban dan sebagainya, tentu pemanfaatan sumber energi skala kecil yang tersedia tersebut dapat meningkatkan akses energi secara efisien dan efektif. Selain itu, dapat membantu untuk keamanan sistem dan mengembalikan operasi jaringan selama keadaan darurat dan / atau setelah pemadaman. Dalam berbagai pustaka (Alemi & Gharehpetian, 2008), (Alonso & Amaris, 2009), (Parizad, Khazali, & Kalantar, 2010), (Gautam, Vittal, & Harbour, 2010) telah dikembangkan metodologi dengan bermacam tujuan dengan menganalisis pengaruh penempatan optimal DG pada sistem tenaga listrik. Namun sebagian besar diantaranya menggunakan pendekatan optimasi dengan tujuan-tunggal seperti hanya untuk menurunkan P_{loss} transmisi atau meningkatkan kapasitas transfer daya dengan mempertimbangkan stabilitas terutama stabilitas tegangan. Pendekatan dengan optimasi tujuan-tunggal kurang praktis untuk aplikasi lapangan karena pada kenyataannya sering dihadapkan untuk menyelesaikan persoalan optimasi yang melibatkan multi-tujuan secara simultan.

Fokus utama dari integrasi optimal DG dalam penelitian ini adalah untuk meningkatkan profile tegangan sekaligus mereduksi P_{loss} dari saluran transmisi akibat meningkatnya pembebanan sistem (PS) dengan mempertimbangkan keamanan dan stabilitas sebagai kendala sistem. Integrasi unit DG di dekat pusat beban, dapat memanfaatkan sumber energi kecil yang tersedia tersebut dengan efisien dan efektif dan sekaligus juga dapat meningkatkan akses energi serta stabilitas saluran transmisi. Selain itu, hal ini juga membantu untuk keamanan dan pemulihan operasi jaringan selama keadaan darurat dan/atau setelah terjadinya pemadaman listrik.

Metode Penelitian

Pemodelan *Distributed Generation* (DG)

Pembangkitan tersebar terkait dengan penggunaan EBT/bersih skala kecil yang terdiri dari beberapa jenis seperti : energi angin/bayu, sel surya, sel bahan bakar, energi baterai, sistem penyimpanan, sistem kogenerasi, bahan bakar sel, biomassa, turbin mikro, pembangkit listrik tenaga air kecil dan sebagainya. Pengembangan pembangkitan ini memungkinkan untuk dilakukannya diversifikasi energi dalam infrastruktur sistem distribusi dengan kebijakan mengembangkan pembangkit listrik tersebar tersebut yang sering dikenal dengan istilah *Distributed Generation* (DG) dalam sistem tenaga

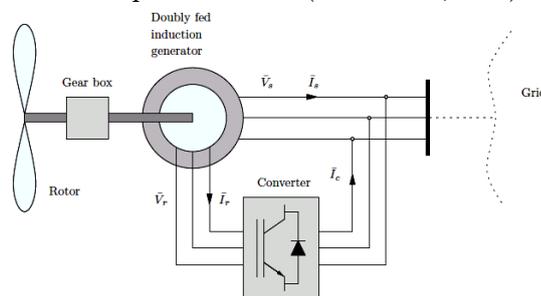
listrik (Atwa & El-Saadany, 2011). Pengembangan unit DG ini dapat dilaksanakan oleh berbagai unsur baik oleh konsumen, pengembang proyek, atau oleh utiliti distribusi dalam hal ini PT PLN dengan berbagai keuntungan yang bisa diperoleh.

Perencanaan daya listrik dengan kehadiran unit DG memerlukan definisi dari beberapa faktor seperti: teknologi terbaik yang akan digunakan, jumlah dan kapasitas serta lokasi terbaik atau sambungan pentahannya karena penempatan unit DG yang tidak optimal dapat mengakibatkan kerugian energi daya yang tinggi dan menyiratkan biaya investasinya juga lebih tinggi. Selain itu, perencanaan yang optimal dari unit DG, seperti turbin angin dan PV, terbatas pada beberapa alokasi yang tersedia karena itu akan tergantung pada lokasi sumber energinya (Alonso & Amaris, 2009)

Terdapat beberapa jenis teknologi DG, baik yang tradisional maupun pembangkit energi baru terbarukan (EBT). Teknologi tradisional meliputi: mikro-turbin, turbin pembakaran, siklus gabungan dan mesin pembakaran internal. Teknologi terbarukan diantaranya: energi surya, fotovoltaik, angin, panas bumi, laut dan sebagainya. Unit DG dimodelkan sebagai generator sinkron untuk mikro-turbin, turbin pembakaran, siklus gabungan dan tenaga panas bumi, sedangkan untuk pembangkit energi angin dan mikro hidro diperlakukan sebagai generator induksi. Beberapa teknologi seperti tenaga surya, turbin gas mikro, tenaga fotovoltaik dan sel bahan bakar (Anwar & Pota, 2011), (Ramalakshmi, 2011) dianggap sebagai unit DG dengan inverter elektronika daya. Secara umum, unit DG dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis (Buayai, Wartana, Sreedharan, & Ongsakul, 2011), (Singh, Verma, Singh, & Singh, 2011):

- Tipe 1: DG yang mampu menginjeksikan daya nyata konstan (P)
- Tipe 2: DG yang mampu menginjeksikan baik daya nyata (P) maupun daya reaktif (Q) untuk mengatur tegangan bus (Turbin Gas)
- Tipe 3: DG yang mampu menginjeksikan daya nyata konstan (P) tetapi mengkonsumsi daya reaktif (Q) (Sistem Pembangkit Daya Angin)
- Tipe 4: DG yang hanya mampu memberikan daya reaktif (Q) (Kondenser Sinkron).

Dalam penelitian ini, salah satu dari jenis tersebut yaitu DG tipe- 3, Turbin Angin dengan sistem kecepatan variabel atau lebih dikenal dengan DFIG (*doubly fed induction generator*) yang digunakan sebagai konversi energi (Gautam et al., 2010). Selanjutnya, dukungan daya reaktif juga diperoleh dengan antarmuka elektronika daya yang digunakan mengkoneksikan jaringan tenaga listrik (*grid*) dengan unit DG (Milano, 2005) melalui tranformator penaik tegangan. Gambar 1. memperlihatkan jenis turbin angin kecepatan variabel dengan DFIG, sedangkan Tabel 1. menyajikan beberapa data turbin angin yang diterapkan dewasa ini sebagaimana dilaporkan dalam (Association, 2002).



Gambar 1. Tipe Turbin Angin Kecepatan Variabel dengan DFIG.

Dari Tabel 1. dapat diketahui beberapa jenis Turbin angin dengan berbagai teknik kendalinya masing-masing yaitu: GD (*gearbox drives*), DD (*direct drive*), VS (*variable speed*), TS (*two speed*), PC (*pitch control*), and TPS (*shift pitch by stall*). Dalam semua jenis turbin tersebut, stator dan rotornya secara langsung terhubung ke grid melalui *slip ring* dan konverter elektronika daya.

Formulasi penyelesaian masalah

Fungsi Tujuan

Semua fungsi objektif yang digunakan dalam penelitian ini diuraikan dalam sub-bagian ini sebagai berikut:

Maksimalisasi Pembebanan Sistem (*Maks. PS*)

Maksimalisasi PS dilakukan dengan menggunakan rumus (1) dan (2) berikut (Saravanan & Slochanal, 2007):

$$\text{Maximize } f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \{\lambda\} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } TS = \sum_{i=1}^{N_l} SBL_i \times \sum_{j=1}^{N_b} PTB_j \quad (2)$$

dengan TS adalah batas faktor thermal dan pelanggaran tegangan. SBL_i dan PTB_j masing-masing menyatakan faktor PS saluran dan faktor pelanggaran tegangan bus. N_l dan N_b masing-masing adalah jumlah total saluran dan bus. Sedangkan λ adalah parameter beban dari sistem, yang dimaksudkan untuk mendapatkan jumlah maksimum daya yang mampu dipasok ke jaringan dengan tetap memenuhi batas-batas keamanan sistem.

Minimalisasi Rugi Daya Nyata (*Min. P_{loss}*)

Minimalisasi P_{loss} pada saluran transmisi dapat dinyatakan dengan rumus berikut (3) berikut (Anwar & Pota, 2011), (Wartana & Agustini, 2011).

$$f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{k=1}^{N_l} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos t(\delta_i - \delta_j)] \quad (3)$$

dengan N_l adalah jumlah saluran transmisi; g_k adalah konduktor k^{th} saluran; $V_i \angle \delta_i$ and $V_j \angle \delta_j$ masing-masing adalah tegangan pada ujung bus- i dan j dari saluran k^{th} .

Fungsi Kendala

Kendala ketidaksamaan

Kendala ketidaksamaan $h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ adalah batas-batas variable keadaan dan variable kendali. Daya aktif pembangkit P_G , daya reaktif Q_G , tegangan V_i , dan sudut fasa δ_i dinyatakan oleh batas-batasnya sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} P_{G_i}^{\min} &\leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} & i = 1, \dots, m \\ Q_{G_i}^{\min} &\leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} & i = 1, \dots, m \\ V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} & i = 1, \dots, N_b \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Kendala pembebanan transmisi P_{ij} dinyatakan dengan persamaan:

$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}; \quad ij = 1, \dots, N \quad (5)$$

Faktor pembebanan λ dibatasi oleh:

$$1 \leq \lambda \leq \lambda^{\max} \quad (6)$$

Kendala Stabilitas Sistem Daya

Fast voltage stability index (FVSI)

FVSI yang dikembangkan oleh Musirin (Musirin & Abdul Rahman, 2002) yang digunakan dalam penelitian ini untuk menjamin keamanan pembebanan pada bus sistem. FVSI adalah metode yang digunakan untuk menyatakan kondisi stabilitas tegangan berdasarkan pada saluran atau bus yang dinyatakan dengan:



$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (7)$$

Dengan, Z adalah impedansi saluran. X adalah reaktansi saluran. Q_j daya reaktif pada sisi terima. and V_i adalah tegangan pada sisi kirim.

Indeks FVSI yang digabungkan dalam DG menjamin bahwa tiak ada bus yang akan jatuh akibat pembebanan lebih.

Line stability factor (LQP).

Indeks stabilitas sistem juga dijamin dengan *LQP* yang dikembangkan oleh A Mohamed et al (Suganyadevia & Babulal, 2009) yang dinyatakan sebagai berikut:

$$LQP = 4 \left(\frac{X}{V_i^2} \right) \left(\frac{X}{V_i^2} P_i^2 + Q_j \right) \quad (8)$$

dengan, X adalah reaktansi, V_i adalah tegangan sisi kirim, P_i daya nyata pada sisi kirim and Q_j adalah daya reaktif pada sisi terima. Nilai *LQP* tersebut harus dijaga kurang dari 1.00 untuk mempertahankan sistem dalam kondisi stabil. Sistem kendali *LQP* menjamin bahwa tidak akan terjadi pembebanan lebih pada saluran dalam berbagai kondisi jaringan.

Implementasi teknik NSGA-II untuk integrasi optimal DG

Sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal DG dalam grid untuk meningkatkan profile tegangan sekaligus meminimalkan rugi daya nyata saluran transmisi dengan memaksimalkan PS sistem serta mempertahankan margin keamanan dan stabilitas sistem. Dengan demikian persoalan optimasi multi-tujuan ini dapat dipecahkan secara simultan dengan menggunakan persamaan berikut:

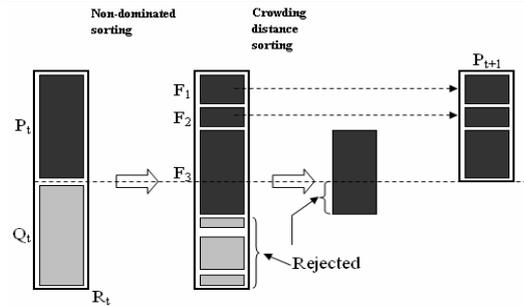
Minimize $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}), f_2(\mathbf{x}, \mathbf{u})]$ (9)

s.t. $\begin{cases} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 & j = 1, \dots, M \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 & k = 1, \dots, K \end{cases}$ (10)

Dengan f_1 dan f_2 dinyatakan dengan vector tujuan f . sementara \mathbf{x} dan \mathbf{u} masing-masing merupakan variable dependen dan variable control. Dalam penelitian ini. integrasi optimal dan kapasitas DG akan dilakukan dalam beberapa studi kasus yaitu:

- a) Kasus-1 (base case) : tanpa menggunakan DG.
- b) Kasus-2: DG dengan mempertimbangkan kestabilan sistem.

Dalam penelitian ini teknik optimasi multi tujuan dikenal dengan nama NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*) yang dikembangkan dalam (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002). (Sebaa & Boudour, 2008) akan diterapkan untuk memecahkan tujuan dari persoalan integrasi optimal yang diusulkan tersebut. Gambar 2. menunjukkan prosedur iterasi pertama NSGA-II.



Gambar 2. Prosedur NSGA-II

Teknik NSGA-II untuk penyelesaian persoalan optimasi tersebut akan diuji pada sistem uji standar IEEE 14-bus (Zimmerman, Murillo, x, nchez, & Thomas, 2011). Beban sistem dinyatakan sebagai daya konstan atau beban PQ dengan faktor daya tetap yang kenaikan beban pada setiap bus beban dilakukan berdasarkan persamaan (1) dan (2).

Lokasi dan kapasitas DG dipertimbangkan sebagai variabel keputusan, sementara jumlah dan tipe DG ditetapkan dalam simulasi hanya satu dengan semua kendala-kendalanya dipilih sejak awal. Untuk penempatan unit DG, semua bus-beban sistem dinominasikan sebagai lokasi optimal dari membangkit tersebut dan dinyatakan sebagai variabel diskrit. Parameter NSGA-II untuk simulasi semua kasus optimasi dinyatakan pada Tabel 2.

Tabel 1. Parameter NSGA-II

Populasi	Iterasi	Ukuran <i>Pool</i>	Ukuran <i>Tour</i>	η_c
100	50	25	2	20

Untuk mengevaluasi karakteristik keragaman solusi yang diperoleh dari simulasi, titik solusi kompromi terbaik dari Pareto nya akan dibandingkan dengan solusi optimal dari tujuan-tujuan optimasi yang terkait yaitu dengan PS terbaik (Maks. PS) dan P_{loss} terbaik (Min. P_{loss}) untuk setiap tujuan optimasi tersebut.

Hasil dan Pembahasan

Data dan Metode Simulasi

Algoritma NSGA II yang diusulkan dalam penyelesaian masalah optimasi dalam penelitian ini dilakukan pengujian pada modifikasi sistem uji standar IEEE 14-bus (Milano, 2005), (Zimmerman, Murillo, & Thomas, 2011). Sistem uji ini terdiri dari dua generator yang terletak pada bus 1 dan 2, tiga kompensator sinkron yang digunakan hanya untuk memasok daya reaktif pada bus 3, 6 dan 8. Jenis DG yang terintegrasi dalam simulasi ini adalah turbin angin kecepatan variabel dengan DFIG yang dapat menginjeksikan baik daya aktif maupun daya reaktif ke dalam *grid*. Beban dalam hal ini direpresentasikan sebagai beban PQ konstan dengan faktor daya konstan, dan meningkat sesuai dengan (1) dan (2). DG harus dipasang pada sisi tegangan rendah, yang mengandung bus. Jumlah DG ditentukan oleh pengguna, dalam hal ini adalah satu dan hanya DG tipe 3 yang dipertimbangkan.

Hasil simulasi yang dilakukan untuk penyelesaian persoalan multi-tujuan menggunakan teknik optimasi NSGA-II untuk setiap kasus diuraikan sebagai berikut:

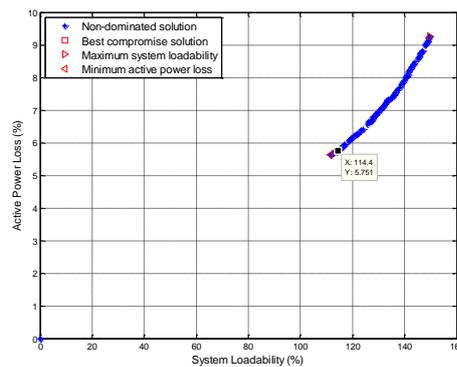
Kasus-1, *base case*: tanpa integrasi DG

Pada kasus ini, pembebanan sistem (PS) dinaikkan menggunakan teknik optimasi NSGA-II tanpa integrasi DG ke dalam grid sehingga menghasilkan nilai optimal untuk kedua objektif yaitu F_1 dan F_2 .

Untuk PS terbaik diperoleh kenaikan PS mencapai 149,59 % sementara untuk P_{loss} terbaik diperoleh nilainya sebesar 0.1625 p.u. sebagaimana ditunjukkan Tabel. 2. Disamping itu, pada tabel yang sama, teknik optimasi NSGA-II juga dapat memberikan solusi kompromi (Sk) terbaik yaitu $PS(F_1)$ dan $P_{loss}(F_2)$ masing-masing sebesar 114,4 % dan 0,1704 p.u. dan *Pareto front* untuk solusi kompromi terbaik ini disajikan pada Gambar 2.

Tabel 2. Optimasi dua-objektif dengan NSGA-II untuk Kasus-1 pada sistem uji IEEE 14-bus

	Lokasi	Ukuran		$PS(F_1)$	$P_{loss}(F_2)$
	(bus)	MW	MVAR	(%)	(pu)
PS terbaik	-	-	-	149.59	0.3593
P_{loss} terbaik	-	-	-	111.51	0.1625
Sk terbaik	-	-	-	114.40	0.1704



Gambar 2. *Pareto front* kasus-1 untuk optimasi dua-objektif dengan NSGA-II pada sistem IEEE 14-bus

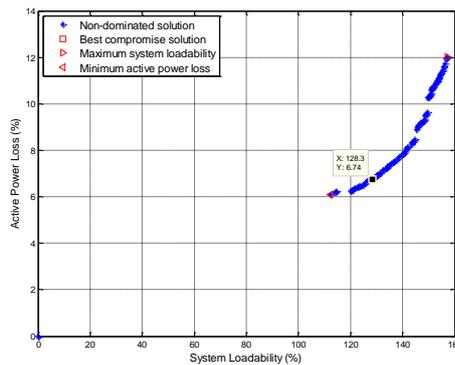
Kasus 2; dengan integrasi DG ke dalam grid.

Gambar 3 menunjukkan grafik himpunan hasil solusi terbaik yang diperoleh program teknik optimasi yang diusulkan (*Pareto front*) berdasarkan jumlah populasi yang ditetapkan dalam penyelesaian masalah optimasi Kasus-2, dengan optimasi dua-obyektif yaitu: memaksimalkan pembebanan sistem (PS) dan meminimalkan rugi daya nyata (P_{loss}) pada sistem uji standard IEEE 14-bus dengan integrasi optimal SDG kedalam sistem tersebut. Himpunan solusi pada perbatasan non-dominasi ini dapat digunakan oleh pengambil keputusan sebagai masukan untuk memilih solusi kompromi akhir dengan menggunakan fungsi keanggotaan yang dinormalisasi. Hasil yang diperoleh disajikan dalam Tabel 3 yang menunjukkan bahwa solusi kompromi terbaik dari integrasi optimal DG dalam sistem dengan mempertimbangkan semua kendala stabilitas diperoleh lokasi terbagik DG adalah pada bus 8 dengan kapasitas daya 49,91 MW dan -11,56 MVAR.

Selain itu, pemasangan DG pada bus yang sama memberikan PS terbaik yaitu 157,08% tetapi dengan P_{loss} sebesar 0,4885 pu yang merupakan nilai tertinggi dalam hal ini. Selain itu, PS ini cukup besar dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dalam kasus satu seperti yang diberikan Tabel 4. Dari tabel tersebut P_{loss} terbaik dalam hal ini telah diperoleh sebesar 0,1772 pu dengan memasang DG pada bus 14 walaupun hanya dapat meningkatkan PS sebesar 112,24% yang merupakan PS terendah dalam kasus-2.

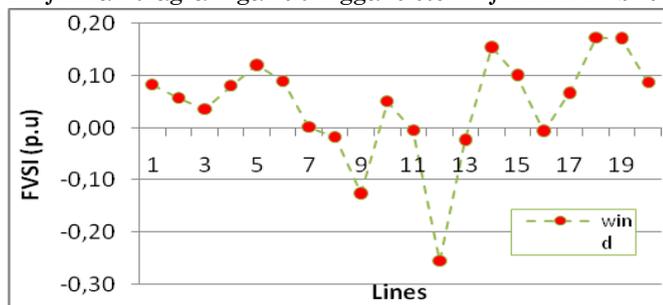
Tabel 3. Optimasi dua-objektif dengan NSGA-II untuk Kasus-2 pada sistem uji IEEE 14-bus

	Lokasi	Ukuran		$PS(F_1)$	$P_{loss}(F_2)$
	(bus)	MW	MVAR	(%)	(bus)
PS terbaik	8	87.52	-3.24	157.08	0.4885
P_{loss} terbaik	14	47.47	-17.34	112.24	0.1772
Sk terbaik	8	49.91	-11.46	128.27	0.2239

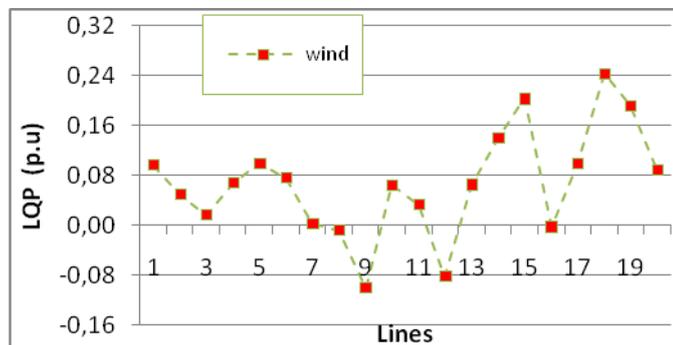


Gambar 3. Pareto front kasus-2 untuk optimasi dua-objektif dengan NSGA-II pada sistem IEEE 14-bus

Indeks stabilitas tegangan dan stabilitas saluran, masing-masing dinyatakan dengan indeks FVSI dan faktor LPQ untuk kasus-2 diperoleh nilainya jauh kurang dari 1.00 seperti yang ditunjukkan masing-masing pada Gambar 4 dan 5. Indeks ini digunakan untuk menjaga stabilitas jaringan pada berbagai tingkat pembebanan sistem untuk menjamin bahwa tidak ada bus yang akan jatuh akibat pembebanan lebih dan tidak ada saluran yang mengalami pembebanan lebih pada setiap kondisi jaringan. Gambar 6 menunjukkan diagram garis tunggal sistem uji IEEE 14-bus untuk Kasus-2.



Gambar 4. FVSI kasus-2 untuk optimasi dua-objektif dengan NSGA-II pada sistem IEEE 14-bus



Gambar 5. LQP kasus-2 untuk optimasi dua-objektif dengan NSGA-II pada sistem IEEE 14-bus



3. Anwar, A., & Pota, H. R. (2011, 25-28 Sept. 2011). *Loss reduction of power distribution network using optimum size and location of distributed generation*. Paper presented at the Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian.
4. Association, E. W. E. (2002). *Wind Force 12 [: A Blueprint to Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020*: EWEA.
5. Atwa, Y. M., & El-Saadany, E. F. (2011). Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems. *Renewable Power Generation, IET*, 5(1), 79-88.
6. Buayai, K., Wartana, I. M., Sreedharan, S., & Ongsakul, W. (2011). A Multi-objective Optimal Placement of Multi-Type DG for Enhancement of Power System Performance by NSGA-II. *GMSARN International Journal*, 5(2), 97-104.
7. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 6(2), 182-197.
8. Gautam, D., Vittal, V., & Harbour, T. (2010, 25-29 July 2010). *Impact of increased penetration of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.
9. Ghosh, S., Ghoshal, S. P., & Ghosh, S. (2010). Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(8), 849-856.
10. Meegahapola, L. G., Abbott, S. R., Morrow, D. J., Littler, T., & Flynn, D. (2011, 24-29 July 2011). *Optimal allocation of distributed reactive power resources under network constraints for system loss minimization*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE.
11. Milano, F. (2005). An Open Source Power System Analysis Toolbox. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 20(3), 1199-1206.
12. Musirin, I., & Abdul Rahman, T. K. (2002, 2002). *Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system*. Paper presented at the Student Conference on Research and Development, SCORED 2002.
13. Parizad, A., Khazali, A., & Kalantar, M. (2010, 11-13 May 2010). *Optimal placement of distributed generation with sensitivity factors considering voltage stability and losses indices*. Paper presented at the Electrical Engineering (ICEE), 2010 18th Iranian Conference on.
14. Ramalakshmi, S. S. (2011, 15-17 Dec. 2011). *Optimal siting and sizing of distributed generation using fuzzy-EP*. Paper presented at the Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEECE), 2011 International Conference on.
15. Saravanan, M., & Slochanal, S. M. R., Venkatesh, P., Abraham, J. Prince Stephen. (2007). Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability. *Electric Power Systems Research*, 77(3-4), 276-283.
16. Sebaa, K., & Boudour, M. (2008, 20-24 July 2008). *Power system dynamic stability enhancement via coordinated design of PSSs and SVC-based controllers using hierarchical real coded NSGA-II*. Paper presented at the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century
17. Singh, B., Verma, K., Singh, D., & Singh, S. (2011). A Novel Approach for Optimal Placement of Distributed Generation & FACTS Controllers in Power Systems: An Overview and Key Issues. *International Journal of Reviews in Computing*, 7.
18. Suganyadevia, M. V., & Babulal, C. K. (2009, 4-6 June 2009). *Estimating of loadability margin of a power system by comparing Voltage Stability Indices*. Paper presented at the 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, INCACEC 2009. .
19. Talaat, H. E. A., & Al-Ammar, E. (2011, 17-19 Oct. 2011). *Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms*. Paper presented at the Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on.
20. Wartana, I. M., & Agustini, N. P. (2011, 17-19 July 2011). *Optimal placement of UPFC for maximizing system loadability and minimizing active power losses in system stability margins by NSGA-II*. Paper presented at the Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011 International Conference on.
21. Zimmerman, R. D., Murillo, S., x, nchez, C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 26(1), 12-19.
22. Zimmerman, R. D., Murillo, S. n., C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 26(1), 12-19.