

OPTIMASI *TRANSMISSION EXPANSION PLANNING* BERBASIS ALGORITMA GENETIKA

Ikrima Alfi¹, Sarjiya², Oyas Wahyunggoro³

¹Jurusan Teknik Elektro Universitas Teknologi Yogyakarta

^{2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi FT UGM

E-Mail : ikrima.alfi@gmail.com¹

ABSTRACT

Transmission Expansion Planning (TEP) is a basic part of power network planning that determines where, when and how many new transmission lines should be added to the network. Its task is to minimize the network construction and operational cost, while meeting imposed technical, economic and reliability constraints. Genetic Algorithms (GAs) have demonstrated the ability to deal with non-convex, nonlinear, mixed-integer optimization problems, like the TEP problem, better than a number of mathematical methodologies.

This study is divided into two scenarios, scenario 1 is simulated TEP without considering power losses and scenario 2 is simulated by considering the TEP power loss. Used AC load flow in the long term TEP. The simulation is applied to the Garver 6 bus system 230 kV and 400 kV.

Simulation results shows the use of a voltage level of 400 kV is more economical than the 230 kV. TEP with scenario 1 has the initial investment cost is lower compared with TEP scenario 2. However, at the time of implementation, scenario 2 after the 9th year have lower operational costs.

Keywords: AC Load Flow, Genetic Algorithm, Network Losses, Transmission Expansion Planning, Optimization,

PENDAHULUAN

Jaringan transmisi adalah penghubungan antara pusat pembangkit dengan pusat beban yang merupakan salah satu elemen yang sangat penting dalam ketenagaan listrik. Dalam pengembangan jaringan transmisi perlu suatu perencanaan (Transmission Expansion Planning/TEP) yang baik, sehingga biaya investasi pengembangan jaringan transmisi dapat seminimal mungkin namun tetap memenuhi syarat-syarat teknis, ekonomis dan keandalan.

Rugi-rugi daya dari suatu jaringan transmisi sangat menentukan biaya operasi sistem tenaga listrik, sehingga rugi-rugi daya perlu diminimalkan dan dipertimbangkan dalam TEP. Dengan memasukkan rugi-rugi daya dalam fungsi obyektif TEP, diharapkan pengembangan jaringan transmisi yang direncanakan selain meminimalkan biaya investasi, juga meminimalkan biaya operasional sistem pada saat penerapannya.

Perencanaan pengembangan jaringan transmisi merupakan permasalahan yang menjadi pusat perhatian para peneliti di bidang ketenagaan listrik. Garver (1970) mempelopori penelitian mengenai

perencanaan pengembangan jaringan transmisi yang diselesaikan dengan menggunakan metode linear programming.

Perkembangan selanjutnya, metode optimasi TEP yang digunakan cukup bervariasi mulai dari Linear Programming/LP[7], nonlinear programming[1] dan Mix-Integer Non Linear Programming[4] yang merupakan metode optimisasi matematik. Metode optimisasi matematik membutuhkan waktu komputasi yang lama untuk menghitung permasalahan TEP dalam skala besar. Permasalahan TEP juga merupakan permasalahan non-convex. Penggunaan metode optimisasi matematik sering menghasilkan solusi optimal lokal. Salah satu metode untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan metode heuristic.

Metode heuristic yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan TEP adalah Simulated Annealing/SA [5], Tabu Search/TS [12], Ant Colony Optimization/ACO [8] dan Algoritma Genetik/AG [6,10,11]. AG mempunyai sejumlah nilai awal (initial point) yang disebut dengan populasi, sehingga AG dapat memberikan banyak pilihan solusi.

Fungsi obyektif dari TEP konvensional adalah meminimisasi biaya investasi, namun beberapa peneliti menambahkan beberapa parameter yang berbeda, diantaranya adalah Zakariya et al. yang menambahkan rugi-rugi daya corona dalam fungsi obyektif dan kendala operasi. Pengetesan penelitian ini diaplikasikan pada Garver's 6-bus system. Roddriguez et al. mempertimbangkan penambahan kapasitor bank dalam short-term transmission expansion planning, serta menggunakan model AC dalam perhitungan power flow. Penelitian tersebut telah diteskan pada Garver's system dan electrical Brazilian system. Shayegi et al. mempertimbangkan level tegangan dan rugi-rugi saluran pada mid-term transmission expansion planning . Pada penelitian ini rugi-rugisaluran dihitung berdasar DC Load Flow (DCLF). Metode di atas diterapkan pada jaringan transmisi Azerbaijan, Iran.

Penelitian ini mengkaji permasalahan optimasi Static Transmission Expansion Planning dengan menggunakan Algoritma Genetika serta mempertimbangkan rugi-rugi daya. Obyek pada penelitian ini adalah sistem Garver 6 bus, dengan mengambil level tegangan 230 kV dan 400 kV. Jangka waktu perencanaan yang digunakan adalah long-term. Pada perencanaan long-term biasanya model jaringan yang digunakan adalah DC model, namun untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, penulis menggunakan AC model. Perhitungan AC power flow menggunakan program bantu MatPower dan optimasi TEP dengan Algoritma Genetik menggunakan perangkat lunak MATLAB. Ada dua skenario dalam penelitian ini. Skenario pertama adalah simulasi TEP tanpa mempertimbangkan rugi-rugi daya dan skenario kedua adalah simulasi TEP dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya.

Transmission Expansion Planning (TEP)

Tujuan dari Transmission Expansion Planning adalah menentukan: dimana (*where*), kapan (*when*) dan berapa banyak (*how many*) saluran transmisi baru yang harus ditambahkan ke dalam jaringan dengan biaya investasi minimum dan memenuhi kendala-kendala teknis, ekonomi dan keandalan[11].

TEP dapat diklasifikasikan dari berbagai sudut pandang. Berdasar tahap perencanaan terdapat dua tipe TEP:

1. Static Transmission Expansion Planning (STEP)
2. Dynamic Transmission Expansion Planning (DTEP)

STEP menentukan dimana (*where*) dan berapa banyak (*how many*) saluran transmisi baru harus ditambahkan ke jaringan selama masa perencanaan tertentu. Jika perencanaan dibagi menjadi beberapa tahap maka disebut sebagai *dynamic transmission expansion planning* (DTEP) dan DTEP menentukan kapan (*when*) saluran baru harus ditambahkan.

A. Fungsi Obyektif TEP

Fungsi obyektif TEP konvensional hanya meminimisasi biaya investasi, hal ini dapat ditulis sebagai :

$$C_T = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} CL_{ij} n_{ij}$$

Pada penelitian ini, selain meminimisasi biaya investasi, juga akan memperhitungkan biaya rugi-rugi jaringan pada kekangan. Fungsi obyektif dari penelitian ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$C_T = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} CL_{ij} n_{ij} + K \sum_{i=1}^{NYE} Ploss_i$$

dimana:

- C_T : Total biaya pengembangan jaringan transmisi
- CL_{ij} : Biaya konstruksi saluran pada cabang i-j
- n_{ij} : Jumlah saluran yang ditambahkan pada cabang i-j
- C_{MWh} : Biaya dari satu MWh
- K : koefisien rugi-rugi
- NYE : perkiraan waktu hidup (*life time*) dari pengembangan jaringan.
- NB : total cabang

B. Kekangan TEP

$$\begin{aligned} P(V, \theta, n) - P_G + P_D &= 0 \\ Q(V, \theta, n) - Q_G + Q_D &= 0 \\ P_g^{min} &\leq P_g \leq P_g^{max} \\ Q_g^{min} &\leq Q_g \leq Q_g^{max} \\ V^{min} &\leq V \leq V^{max} \\ (n_{ij} + n_{ij}^0) S^{from} &\leq (n_{ij} + n_{ij}^0) S^{max} \\ (n_{ij} + n_{ij}^0) S^{to} &\leq (n_{ij} + n_{ij}^0) S^{max} \\ 0 &\leq n_{ij} \leq n_{ij}^{max} \\ Line_Loading &\leq LL_{max} \end{aligned}$$

Dimana:

- P_G : Daya aktif pembangkit
 Q_G : Daya reaktif pembangkit
 P_D : Daya aktif beban
 Q_D : Daya reaktif beban
 n_{ij}^0 : jumlah saluran pada awal sistem
 n_{ij} : jumlah saluran yang ditambahkan
 n_{ij}^{max} : jumlah maksimum saluran yang dapat ditambahkan pada cabang i-j
 LL_{max} : Kapasitas beban maksimum

Persamaan untuk $P(V, \theta, n)$ dan $Q(V, \theta, n)$ adalah:

$$P_i(V, \theta, n) = V_i \sum_{j \in N} V_j [G_{ij}(n) \cos \theta_{ij} + B_{ij}(n) \sin \theta_{ij}]$$

$$Q_i(V, \theta, n) = V_i \sum_{j \in N} V_j [G_{ij}(n) \sin \theta_{ij} - B_{ij}(n) \cos \theta_{ij}]$$

dengan:

- G_{ij} : Konduktans pada cabang i-j
 B_{ij} : susceptans pada cabang i-j
 N : total jumlah bus pada sistem
 θ_i, θ_j : sudut fase pada terminal bus i dan j
 P_{ij}^{max} : daya maksimum yang mengalir pada cabang i-j
 g^{max} : output daya aktif maksimum yang dibangkitkan pada bus k

Elemen-elemen matriks admitans bus (G dan B):

$$G = \begin{cases} G_{ij}(n) = -(n_{ij} g_{ij} + n_{ij}^0 g_{ij}^0) \\ G_{ii}(n) = \sum_{j \in \Omega_i} (n_{ij} g_{ij} + n_{ij}^0 g_{ij}^0) \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} B_{ij}(n) = -(n_{ij} b_{ij} + n_{ij}^0 b_{ij}^0) \\ B_{ii}(n) = b_i^{sh} + \sum_{j \in \Omega_i} (n_{ij} b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + n_{ij}^0 (b_{ij}^0 + (b_{ij}^{sh})^0) \end{cases}$$

Ω_i : semua bus yang terhubung langsung dengan bus i

Persamaan untuk vector S^{from} dan S^{to} adalah:

$$S_{ij}^{from} = \sqrt{(P_{ij}^{from})^2 + (Q_{ij}^{from})^2}$$

$$P_{ij}^{from} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{ij}^{from} = -V_i^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})$$

dan

$$S_{ij}^{to} = \sqrt{(P_{ij}^{to})^2 + (Q_{ij}^{to})^2}$$

$$P_{ij}^{to} = V_j^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{ij}^{to} = -V_j^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) + V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij})$$

Algoritma Genetika

Algoritma genetika adalah algoritma komputasi untuk masalah optimasi yang terinspirasi oleh teori evolusi untuk mencari solusi suatu permasalahan. Terdapat banyak sekali variasi pada Algoritma Genetika, salah satunya adalah Algoritma Genetika untuk masalah optimasi kombinasi, yaitu mendapatkan nilai solusi yang optimal terhadap suatu masalah yang memiliki banyak kemungkinan solusi [14].

Ada beberapa komponen algoritma genetika dalam pembuatan program diantaranya yaitu:

A. Inisialisasi Populasi

Inisialisasi populasi merupakan langkah awal dalam Algoritma Genetik. Populasi dalam penelitian ini dilambangkan dengan bilangan antara 0 dan 9 yang disebut sebagai pengkodean *decimal*, yang tersusun atas kolom dan baris sehingga membentuk suatu matriks berisi bilangan antara 0 dan 9. Pada penelitian ini ditetapkan nilai gen antara 0 sampai 4 yang merupakan nilai maksimal jumlah saluran pada suatu cabang. Pada satu deret baris matriks tersusun atas beberapa kolom. Satu deret baris matriks ini pada AG dikenal dengan istilah kromosom sedangkan jumlah kolom tersebut dikenal dengan istilah jumlah gen. Jumlah gen pada penelitian ini sama dengan jumlah cabang pada jaringan transmisi.

B. Skema Pengkodean

Terdapat tiga skema paling umum yang digunakan dalam pengkodean, yaitu:

- *Real-number encoding*. Pada skema ini, nilai gen berada pada interval $[0, R]$, dimana R adalah bilangan real positif dan biasanya $R = 1$.
- *Decimal encoding*. Setiap gen bisa bernilai salah satu bilangan bulat dalam interval $[0, 9]$.

- *Binary encoding*. Setiap gen hanya bisa bernilai 0 atau 1.

Pada penelitian ini menggunakan pengkodean desimal. Ukuran kromosom sama dengan jumlah cabang. Dalam penelitian ini terdapat 9 cabang. Masing-masing gen mewakili jumlah saluran pada suatu cabang.

1	1	4	2	2	0	1	1	3
n_{1-2}	n_{1-4}	n_{1-5}	n_{2-3}	n_{2-4}	n_{2-6}	n_{3-5}	n_{3-6}	n_{4-6}

Gbr. 1 Struktur kromosom AG.

C. Nilai Fitness

Suatu individu atau kromosom dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performasinya. Fungsi yang digunakan untuk mengukur nilai kecocokan atau derajat optimalitas suatu kromosom disebut dengan *fitness function*. Nilai yang dihasilkan dari fungsi tersebut menandakan seberapa optimal solusi yang diperoleh.

Dalam kasus minimisasi nilai fitness adalah kebalikan dari nilai fungsi tujuan. Fungsi tujuan dari penelitian ini adalah minimisasi biaya investasi dan rugi-rugi daya.

$$f = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} CL_{ij} n_{ij} + K \sum_{i=1}^{NYE} Ploss_i$$

$$Fitness = \frac{1}{f}$$

D. Reproduksi dengan Roulette Wheel

Reproduksi adalah proses penyalinan kromosom sesuai dengan nilai *fitness*. Setiap kromosom dalam populasi akan diseleksi berdasar nilai *fitness*. Probabilitas terpilihnya satu kromosom untuk bereproduksi adalah sebesar nilai *fitness* tersebut dibagi dengan jumlah total nilai *fitness* seluruh kromosom dalam populasi. Secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$$

dengan:

P_i = peluang string atau kromosom i terpilih

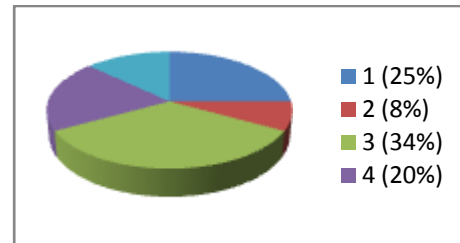
f_i = nilai *fitness* kromosom i

$\sum f_i$ = jumlah nilai *fitness* seluruh kromosom i

Kromosom dengan nilai *fitness* tertinggi akan direproduksi lebih banyak. Jumlah reproduksi untuk satu kromosom sebanding dengan nilai *fitness* tersebut. Kromosom

dengan nilai *fitness* yang lebih besar akan mempunyai kemungkinan direproduksi lebih banyak.

Salah satu cara untuk mengimplementasikan proses reproduksi pada genetika tiruan (*artificial*) adalah dengan menggunakan roda rolet (*roulette wheel*), seperti terlihat pada gambar di bawah:



Gbr. 2 Grafik pembagian nilai *fitness*

Piringan ini dibagi menjadi sektor-sektor dengan jumlah yang sama sesuai ukuran populasi. Besar masing-masing sektor berbeda tergantung dari nilai *fitness* kromosom yang menempati sektor tersebut. Kromosom dengan nilai *fitness* tertinggi menempati sektor yang lebih besar pada piringan rolet.

Calon-calon anggota populasi untuk generasi berikutnya dipilih dengan cara piringan rolet diputar sebanyak jumlah kromosom yang akan ditempatkan pada generasi berikutnya. Apabila pada suatu putaran piringan rolet berhenti pada satu sektor, maka kromosom yang menempati sektor tersebut dipilih sebagai calon anggota populasi berikutnya. Dengan demikian, karena probabilitas dari berhentinya piringan rolet pada suatu sektor sebanding dengan besarnya sektor, maka kromosom dengan nilai *fitness* yang tinggi mempunyai kemungkinan untuk dipilih pada generasi berikutnya.

E. Pindah Silang (crossover)

Proses pindah silang dilakukan dengan memisahkan suatu kromosom menjadi dua bagian dan selanjutnya salah satu bagian ditukar dengan salah satu bagian dari kromosom yang lain yang telah dipisahkan dengan cara yang sama. Proses ini dikenal dengan operator pindah silang (*crossover*) satu titik.

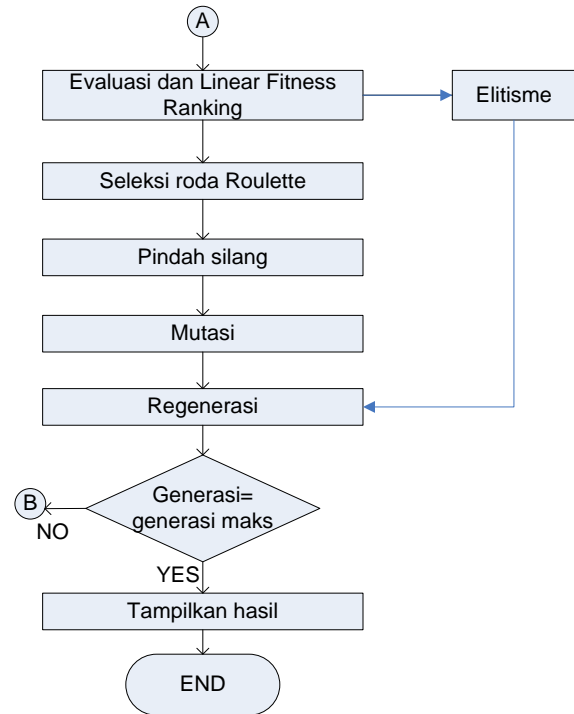
F. Mutasi

Mutasi merupakan proses mengubah nilai dari suatu kromosom. Mutasi ini

berperan untuk menggantikan kromosom yang hilang dari populasi akibat seleksi yang memungkinkan munculnya kembali kromosom yang tidak muncul pada inisialisasi populasi. Untuk semua kromosom yang ada, jika bilangan acak yang dibangkitkan kurang dari probabilitas mutasi (P_{mut}) yang ditentukan maka kromosom tersebut di ubah menjadi nilai kebalikannya.

G. Elitisme

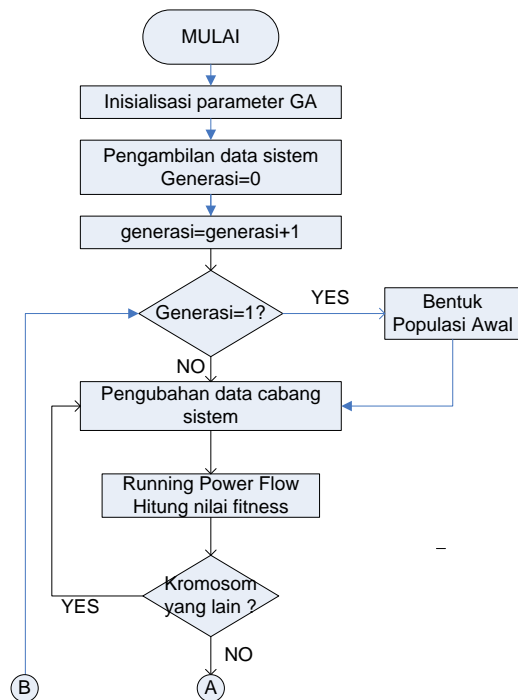
Karena seleksi dilakukan secara random, maka tidak ada jaminan bahwa suatu individu bernilai fitness tertinggi akan selalu terpilih. Kalaupun individu bernilai fitness tertinggi terpilih, mungkin saja individu tersebut akan rusak (nilai fitness turun) karena proses pindah silang. Untuk menjaga individu tersebut tidak hilang selama evolusi, maka perlu dibuat satu atau beberapa kopinya. Prosedur ini dikenal sebagai *elitism*.



Gbr . 3 Diagram alir dari TEP dengan menggunakan Algoritma Genetika

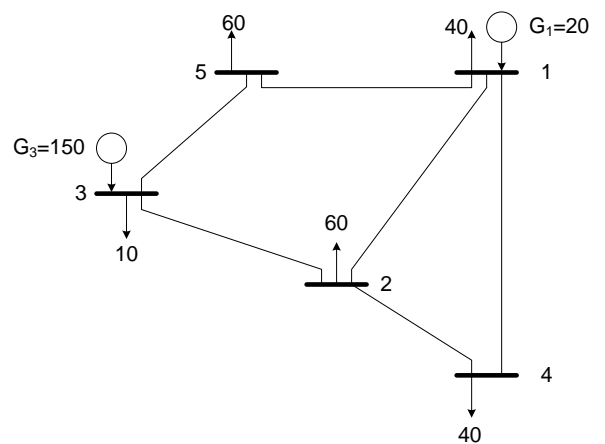
METODE PENELITIAN

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gbr. 3.

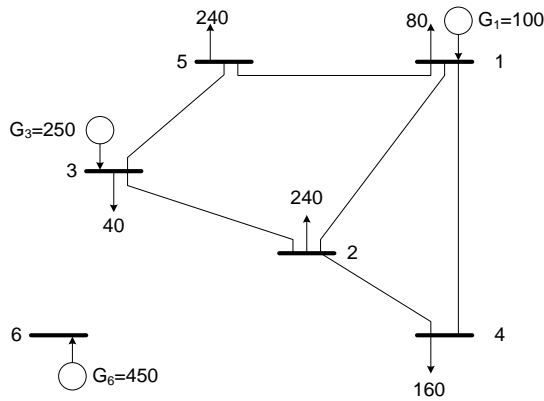


HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi optimasi *Transmission Expansion Planning* dengan menggunakan Algoritma Genetik dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya diterapkan pada sistem Garver 6 bus. Ada dua skenario yang dipakai dalam penelitian ini. Skenario pertama tanpa mempertimbangkan rugi-rugi daya, sementara skenario kedua dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya.



Gbr 4. Jaringan Awal Sistem Garver 6 Bus



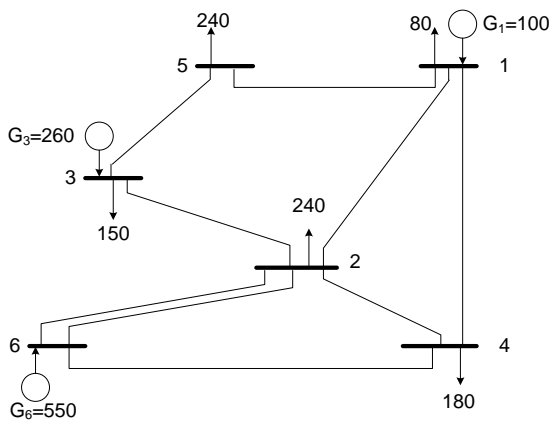
Gbr 5. Jaringan awal sistem garver 6 bus dengan rencana beban dan pembangkit

Hasil Simulasi TEP Sistem Garver 6 Bus 230 kV

1) Skenario 1 Sistem Garver 230 kV:

TABEL I
JUMLAH SALURAN HASIL SIMULASI SKENARIO 1 SISTEM GARVER 230 kV

Cabang	$LL_{max}=50\%$ n_{ij}
1 - 2	1
1 - 4	1
1 - 5	1
2 - 3	1
2 - 4	1
2 - 6	2
3 - 5	1
3 - 6	0
4 - 6	1



Gbr 6. Konfigurasi jaringan hasil simulasi skenario 1 sistem Garver 230 kV

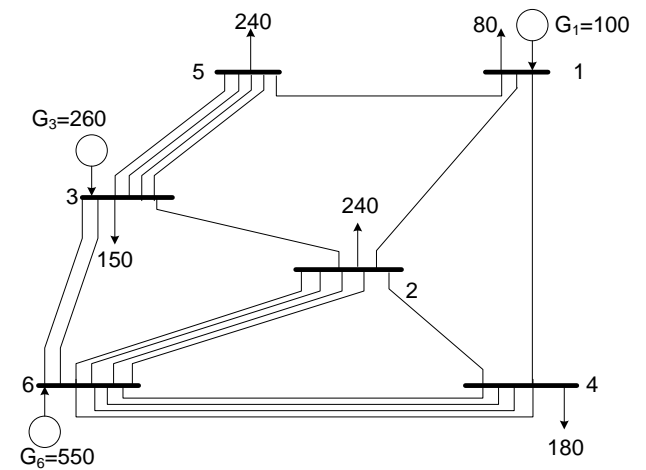
TABEL II
PENAMBAHAN SALURAN DAN BIAYA INVESTASI PADA SKENARIO 1 SISTEM GARVER 230 kV

Cabang	Jumlah saluran yang ditambahkan
2 - 6	2
4 - 6	1
Biaya investasi	17,488 M US\$

2) Skenario 2 Sistem Garver 230 kV:

TABEL III
JUMLAH SALURAN HASIL SIMULASI SKENARIO 2 SISTEM GARVER 230 kV

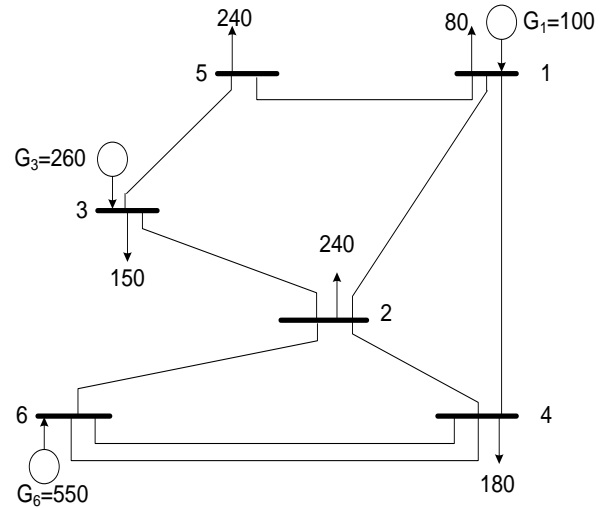
Cabang	n_{ij}
1 - 2	1
1 - 4	1
1 - 5	1
2 - 3	1
2 - 4	1
2 - 6	4
3 - 5	4
3 - 6	2
4 - 6	4



Gbr.7 Konfigurasi jaringan hasil simulasi skenario 2 sistem Garver 230 kV

TABEL IV
PENAMBAHAN SALURAN DAN BIAYA
INVESTASI PADA SKENARIO 2 SISTEM GARVER
230 kV

Cabang	Jumlah saluran yang ditambahkan
2 - 6	4
3 - 5	3
3 - 6	2
4 - 6	4
Biaya investasi	68,012 M US\$



Gbr. 9 Konfigurasi jaringan hasil simulasi skenario 1 sistem Garver 400 kV

Hasil Simulasi TEP Sistem Garver 400 kV

1) Skenario 1 Sistem Garver 400 kV:

TABEL V
JUMLAH SALURAN HASIL SIMULASI SKENARIO
1 SISTEM GARVER 400 kV

Cabang	n_{ij}
1 - 2	1
1 - 4	1
1 - 5	1
2 - 3	1
2 - 4	1
2 - 6	0
3 - 5	1
3 - 6	0
4 - 6	2

TABEL VI

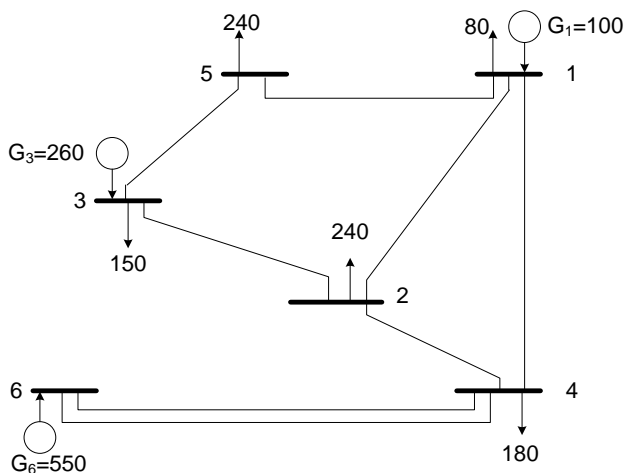
PENAMBAHAN SALURAN DAN BIAYA
INVESTASI PADA SKENARIO 1 SISTEM GARVER
400 kV

Cabang	Jumlah saluran yang ditambahkan
4 - 6	2
Biaya investasi	19,778 M US\$

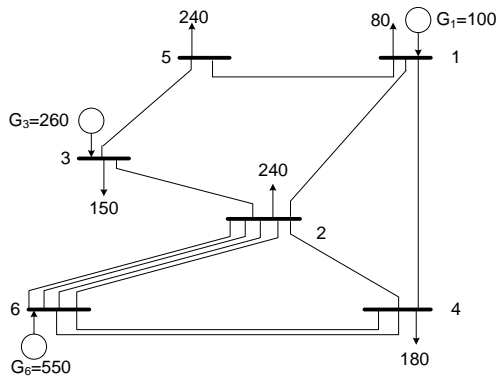
2) Skenario 2 Sistem Garver 400 kV:

TABEL VII
KONFIGURASI HASIL SIMULASI SKENARIO 2
SISTEM GARVER 400 kV

Cabang	n_{ij}
1 - 2	1
1 - 4	1
1 - 5	1
2 - 3	1
2 - 4	1
2 - 6	4
3 - 5	1
3 - 6	0
4 - 6	2



Gbr. 8 Konfigurasi jaringan hasil simulasi skenario 1 sistem Garver 400 kV



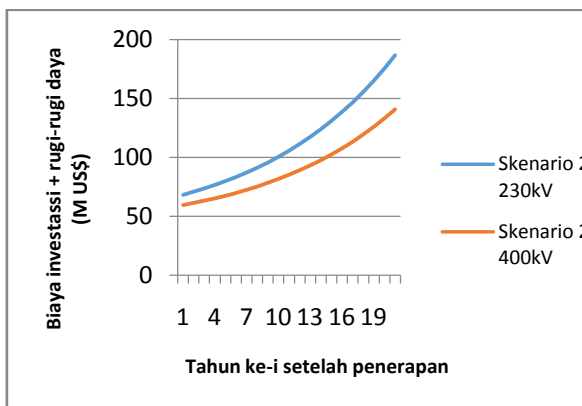
Gbr .10 Konfigurasi jaringan hasil simulasi skenario 2 sistem Garver 400 kV

Tabel VIII

PENAMBAHAN SALURAN DAN BIAYA INVESTASI SKENARIO 2 SISTEM GARVER 400 kV

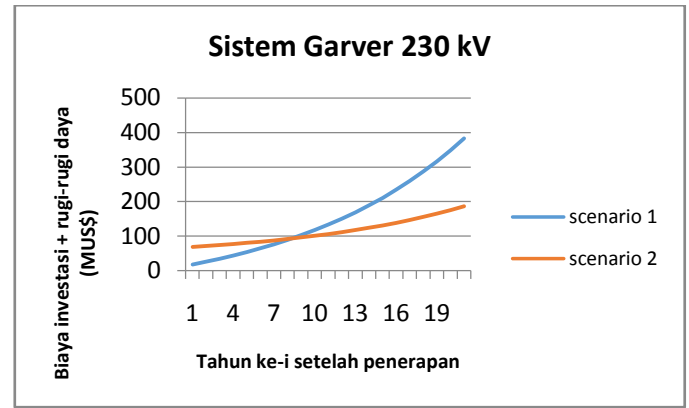
Cabang	Jumlah saluran yang ditambahkan
2 - 6	4
4 - 6	2
Biaya investasi	59,33 M US\$

Perbandingan hasil simulasi TEP skenario 2 sistem Garver 230 kV dengan 400 kV dapat dilihat pada Gbr. 11.

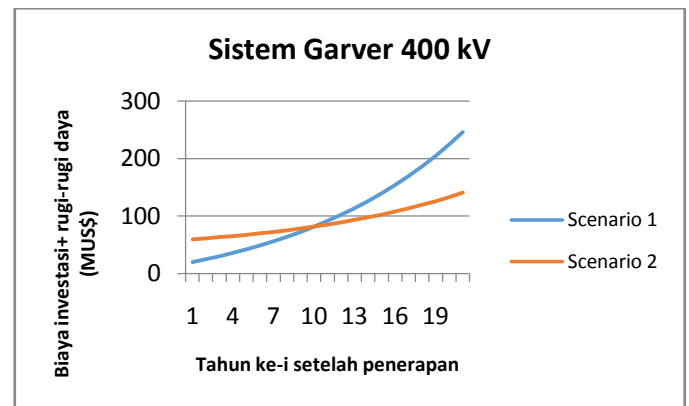


Gbr.11 Perbandingan sistem Garver 230 kV dengan 400 kV

Dari Tabel IV dan VIII biaya investasi awal untuk sistem Garver 230 kV lebih besar dibandingkan dengan sistem Garver 400 kV dengan selisih sebesar 8,68 M US\$. Gbr 11 menunjukkan bahwa biaya operasional pada level tegangan 230 kV juga lebih tinggi dibanding level tegangan 400 kV.



Gbr 12 Perbandingan biaya investasi + rugi-rugi daya antara skenario 1 dan skenario 2 sistem Garver 230 kV



Gbr 13 Grafik biaya investasi + biaya rugi-rugi daya sistem Garver 400 kV skenario 1 dan skenario 2

Dari grafik terlihat bahwa biaya investasi untuk skenario 1 tampak lebih ekonomis. Hal ini terlihat dari titik awal yang lebih rendah, namun sekitar 9 tahun setelah penerapan, grafik saling berpotongan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa setelah tahun ke-9, skenario 2 lebih ekonomis.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode Algoritma Genetik dengan pengkodean desimal ini dapat bekerja dengan baik untuk menyelesaikan permasalahan "Optimasi *Transmission Expansion Planning* dengan Mempertimbangkan Rugi-Rugi Daya".
2. Pada perencanaan jangka panjang penggunaan level tegangan 400 kV lebih

ekonomis dibanding level tegangan 230 kV.

Biaya investasi awal pada TEP skenario 2 (dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya) lebih mahal dibanding pada TEP skenario 1 (tanpa mempertimbangkan rugi-rugi daya), namun pada penerapannya biaya operasional skenario 2 lebih ekonomis, hal ini karena rugi-rugi daya minimal.

DAFTAR PUSTAKA

Al Hamouz Zakariya, Al-Faraj Ali, 2002, *Transmission Expansion Planning Using Non Linear Programming*, **IEEE**.

Al Hamouz Zakariya, Al Duwais Hussain, Mantawy, El Amin Ibrahim, Al-Faraj Ali, 2003, *A Genetic Algorithm based Transmission expansion Planning*, **Proceedings of the 3rd IASTED International Conference**.

Al Saba Tawfiq, El Amin Ibrahim, 2002, *The Application of Artificial Intelligent Tools to the Transmission Expansion Planning*, *Electronic Power System Research* 62.

Alguacil Natalia, 2003, *Transmission Expansion Planning: A Mixed-Integer LP Approach*, **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 18, pp. 1070–1077.

Braga A.S., Saraiva, 2003, *Transmission Expansion Planning and Long Term Marginal Prices Calculation Using Simulated Annealing*, **IEEE Bologna Power Tech Conference**.

Jalilzadeh, Shayegi, Mahdavi, Hadadian, 2009, *A GA Based Transmission Expansion Planning Considering Voltage Level, Network Losses and Number of Bundle Lines*, **American Journal of Applied Sciences** 6, pp. 987-994.

L.L. Garver, 1970 , *Transmission Network Estimation Using Linear Programming*, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 89, No. 7, pp. 1688-1696.

Leeprechanon N, Limsakul P, Pothiya S, 2010, *Optimal Transmission Expansion Planning Using Ant Colony Optimization*, **Journal of Sustainable Energy & Environment** 1 pp.71-76,

Marsudi Djiteng, 2006, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Graha Ilmu.

Rider Marcos J. Gallego, Luis A. Romero,

Ruben Garcia, Ariovaldo V, 2007, *Heuristic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning*, **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, pp. 1-7.

Rodriguez, Falcao, Taranto, 2008, *Short-term Transmission Expansion Planning with Network Model and Security Constraints*, 16th PSCC.

Silva Edson Luiz, Ortiz J., Oliveira Gerson, Binato Silvio, 2001, *Transmission Expansion Planning Under a Tabu Search Approach*, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol16.

Stevenson, 1982 *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga.

Suyanto, 2005 *Algoritma Genetik dalam MATLAB*, Andi Offset.

LAMPIRAN

Data pembangkit dan beban sistem Garver 6 Bus

Bus	Pembangkitan (MW)		Beban (MW)
	Max	Level	
1	160	100	80
2	-	-	240
3	370	260	150
4	-	-	180
5	-	-	240
6	610	550	-

Data saluran sistem Garver 6 Bus[6]

No cabang	Dari - ke	n_{ij}^0	Jarak (km)
1	1-2	1	200
2	1-4	1	300

3	1-5	1	100
4	2-3	1	100
5	2-4	1	200
6	2-6	0	150
7	3-5	1	100
8	3-6	0	240
9	4-6	0	150

Karakteristik saluran 230 kV dan 400 kV[6]

Tegangan (kV)	Beban maksimum (MVA)	Reaktans (p.u./km)	Resistans (p.u./km)
230	397	3,85e-4	1,22e-4
400	750	1,24e-4	3,5 e-5