

ALOKASI OPTIMAL KAPASITOR SHUNT DENGAN FUZZY DYNAMIC PROGRAMMING

Agus Ulinuha

Teknik Elektro Fakultas Teknik UMS

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Kartasura, Surakarta

agusulin@yahoo.com, agnuha@hotmail.com

ABSTRAK

Sebuah pendekatan baru untuk menentukan lokasi dan ukuran optimal dari kapasitor shunt pada sistem distribusi dengan distorsi harmonik adalah Pemrograman Dinamik Fuzzy. Untuk menentukan lokasi optimal kapasitor dengan Pemrograman Dinamik Fuzzy, rugi daya nyata, simpangan tegangan dan distorsi harmonik, semuanya di nyatakan dalam himpunan fuzzy. Permasalahan dirumuskan untuk meminimalkan rugi daya nyata dan biaya (harga) Kapasitor dengan mematuhi kekangan berupa batas-batas tegangan dan distorsi harmonik total. Sebuah algortima sederhana yang didasarkan pada konsep himpunan fuzzy digunakan untuk menentukan solusi optimal. Metoda ini diharapkan memberikan kemudahan dalam menemukan solusi optimal dengan menghilangkan banyak jalur penelusuran yang tidak berguna.

Kata Kunci : Logika fuzzy, pemrograman dinamik, distrosi harmonik, daya reaktif, penempatan kapasitor.

PENDAHULUAN

Kapasitor dipakai secara luas dalam sistem distribusi tenaga listrik sebagai kompensasi terhadap daya reaktif untuk mereduksi rugi daya, pengaturan tegangan dan peningkatan kapasitas sistem. Keberhasilan fungsi kompensasi ini sangat tergantung pada hal-hal sebagai berikut :

1. Jumlah dan lokasi Kapasitor
2. Jenis Kapasitor (tetap atau tersaklar)
3. Nilai Kapasitansi Kapasitor
4. Model pengaturan Kapasitor.

Permasalahan umum dalam pemasangan kapasitor untuk keperluan kompensasi adalah penentuan lokasi, jenis dan ukuran optimal dari kapasitor sedemikian, sehingga rugi-rugi daya dan energi dapat

diminimumkan dengan menyertakan pertimbangan biaya dalam perhitungan.

Terdapat sejumlah metode analisis (perhitungan) untuk pemasangan kapasitor. Kebanyakan dari metode perhitungan yang sekarang dikembangkan untuk perhitungan pemasangan kapasitor dirancang untuk bagian linear dari beban listrik dengan mengabaikan bagian non liniernya. Dalam kenyataannya, salah satu bagian dari beban merupakan beban non linier, karena beban yang berupa lampu TL serta peralatan *solid state* yang banyak dipakai dalam rumah tangga dan perkantoran. Beban non linier ini cenderung untuk menimbulkan harmonisa arus dan tegangan pada sistem tenaga dan sistem kendali. Keadaan ini

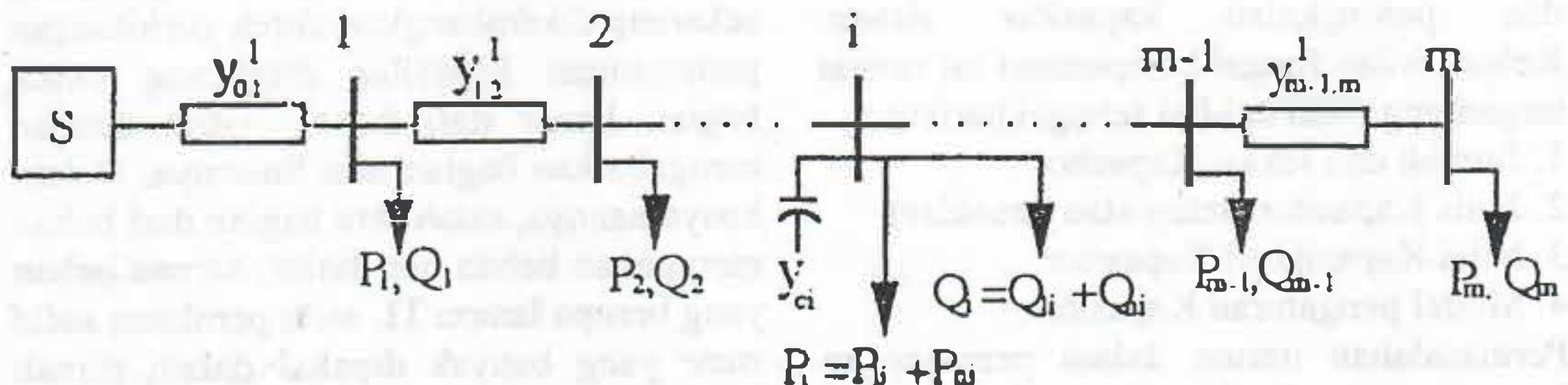
berpotensi untuk menimbulkan sinyal harmonisa dengan magnituda yang membahayakan, stress tambahan pada insulasi peralatan, meningkatkan kegagalan kapasitor dan interferensi pada sistem komunikasi. Lebih jauh, alokasi dan penentuan ukuran Kapasitor yang tidak tepat untuk sistem distribusi dengan sumber arus nonsinusoidal mungkin mengakibatkan persoalan resonansi harmonik. Oleh karena itu diperlukan untuk mempertimbangkan distorsi harmonik dalam persoalan ini.

Tulisan ini menyajikan prosedur untuk memperhitungkan harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linear dalam persoalan penempatan kapasitor. Persoalan dirumuskan dengan fungsi sasaran berupa minimalisasi rugi daya nyata serta biaya kapasitor dengan mematuhi kekangan tegangan bus serta pembatasan faktor distorsi harmonik. Berdasarkan teori himpunan fuzzy, 3 fungsi keanggotaan dapat digunakan masing-masing untuk mendiskripsikan rugi daya, simpangan tegangan bus dan distorsi harmonik total. Pemrograman dinamik fuzzy merupakan metode yang kemudian diusulkan untuk memperoleh lokasi yang layak. Algoritma yang diusulkan ini diharapkan akan banyak

mengurangi waktu dan beban perhitungan dalam penyelidikan lokasi-lokasi yang layak. Ukuran yang sesuai untuk kapasitor yang dipasang pada setiap lokasi yang layak, kemudian dapat diselesaikan dengan meminimumkan fungsi biaya yang ditentukan dengan metode variasi lokal. Efektifitas dari teknik yang disajikan ini akan ditunjukkan pada sistem tenaga praktis dengan beban non linear.

DISKRIPSI DAN RUMUSAN PERMASALAHAN

Persoalan penempatan kapasitor secara optimal, sebagaimana dibahas pada bagian sebelumnya, mempunyai banyak parameter seperti lokasi, tipe, kekangan tegangan, harga kapasitor serta variasi beban dalam sistem. Mempertimbangkan seluruh variabel dalam permasalahan alokasi akan membuat persoalan sangat kompleks. Untuk menyederhanakan analisis, hanya kapasitor tetap yang akan diperhitungkan dalam tulisan ini dengan asumsi sebagai berikut : 1. rangkaian segaris yang disederhanakan, 2. pemuatan saluran (*line charging*) diabaikan 3. beban tak-ubah waktu. Pemuatan saluran relatif lebih kecil dibandingkan pemuatan pada bank kapasitor pada sistem distribusi.



Gambar 1. Sistem distribusi m-bus radial, dengan bus i berisi beban dan kapasitor shunt

Gambar 1. menunjukkan sebuah sistem distribusi m-bus radial, dengan bus i berisi beban dan kapasitor shunt. Arus harmonik ditimbulkan oleh beban non linear yang diinjeksikan pada tiap bus. Untuk mengidentifikasi lebih presisi sumber arus harmonik dengan komponen beban bervariasi, digunakan konsep komposisi beban dan beban diklasifikasikan sebagai linear dan tak linear. Simbol-simbol yang digunakan pada Gambar 1. diterangkan sebagai berikut :

- $y_{i,i+1}^1$: Admitansi cabang antara bus i dan $i+1$
- y_{ci}^1 : Admitansi kapasitor shunt pada bus i
- P_{li}, Q_{li} : Beban aktif dan reaktif linear pada bus i
- P_{ni}, Q_{ni} : Beban aktif dan reaktif tak linear pada bus i
- P_i : Daya aktif total pada bus i ;
 $P_i = P_{li} + P_{ni}$
- Q_i : Daya reaktif total pada bus i ;
 $Q_i = Q_{li} + Q_{ni}$

Pada notasi di atas, superscript 1 berkaitan dengan nilai frekwensi fundamental. Tegangan bus ditentukan melalui persamaan berikut :

$$P_i - \sum_{j=i-1}^{i+1} |Y_{ji}^1| |V_j^1| |V_i^1| \cos(\delta_i^1 - \delta_j^1 - \theta_{ji}^1) = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$Q_i - \sum_{j=i-1}^{i+1} |Y_{ji}^1| |V_j^1| |V_i^1| \sin(\delta_i^1 - \delta_j^1 - \theta_{ji}^1) = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

dengan

$$Y_{ji}^1 = |Y_{ji}^1| \angle \theta_{ji}^1$$

$$= \begin{cases} -y_{ji}^1, & \text{jika } j \neq i \\ y_{i-1,i}^1 + y_{i,i+1}^1 + y_{ci}^1, & \text{jika } j = i \end{cases}$$

dan $V_i^1 (= |V_i^1| \angle \delta_i^1)$ merupakan tegangan fundamental pada bus i . Solusi dari persamaan tersebut juga dapat dicari dengan metoda aliran daya Newton-Raphson. Pada frekwensi daya, rugi daya pada bagian saluran antara bus i dan $i+1$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$P_{loss(i,i+1)}^1 = R_{i,i+1} (|V_{i+1}^1 - V_i^1| |y_{i,i+1}^1|)^2 \quad (3)$$

Pada frekwensi yang lebih tinggi, sistem tenaga dimodelkan sebagai kombinasi sumber arus harmonik dan elemen-elemen pasif. Karena admitansi dari komponen-komponen sistem bervariasi terhadap orde harmonik, matrik admitansi dimodifikasi untuk setiap orde harmonik yang dipelajari. Jika efek kulit pada frekwensi tinggi diabaikan, admitansi beban frekwensi harmonik ke- n , admitansi kapasitor shunt dan admitansi penyulang, masing-masing diberikan dalam persamaan sebagai berikut :

$$y_{li}^n = P_{li} / |V_i^1|^2 - j Q_{li} / n |V_i^1|^2 \quad (4)$$

$$y_{ci}^n = n y_{ci}^1 \quad (5)$$

$$y_{i,i+1}^n = 1 / (R_{i,i+1} + j n X_{i,i+1}) \quad (6)$$

Beban-beban linear tersusun atas tahanan yang diparalel dengan reaktans. Beban-beban non linear diperlakukan sebagai sumber arus harmonik, sehingga injeksi sumber arus harmonik yang diakibatkan oleh beban non linear pada bus i diturunkan sebagai berikut :

$$I_i^1 = [(P_{ni} + j Q_{ni}) / V_i^1]^* \quad (7)$$

$$I_i^n = C(n) I_i^1 \quad (8)$$

dengan

I_i^1 : arus fundamental dan

I_i^n : arus harmonik orde n

I_i^n ditentukan oleh $C(n)$, yang merupakan perbandingan arus harmonik orde n terhadap arus fundamental. Dalam kasus ini, $C(n)$ diperoleh dari uji lapangan dan analisis Fourier untuk seluruh Pelanggan sepanjang penyulang distribusi. Tegangan harmonik dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan aliran beban (pers. 9), yang dengan mudah dapat diturunkan dari persamaan titik. Dengan memanfaatkan kemudahan matriks jarang dan teknik peng-order-an optimal, dapat memperbaiki efisiensi komputasi, persamaan titik dapat secara efisien diselesaikan dengan menggunakan algoritma reduksi Crout [Burden, 1985]. Diagram alir program aliran beban harmonik adalah sebagaimana Gambar 2.

$$Y^n V^n = I^n \quad (9)$$

pada suatu bus i , tegangan r.m.s. didefinisikan sebagai :

$$|V_i| = \left(\sum_{n=1}^N |V_i^n|^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

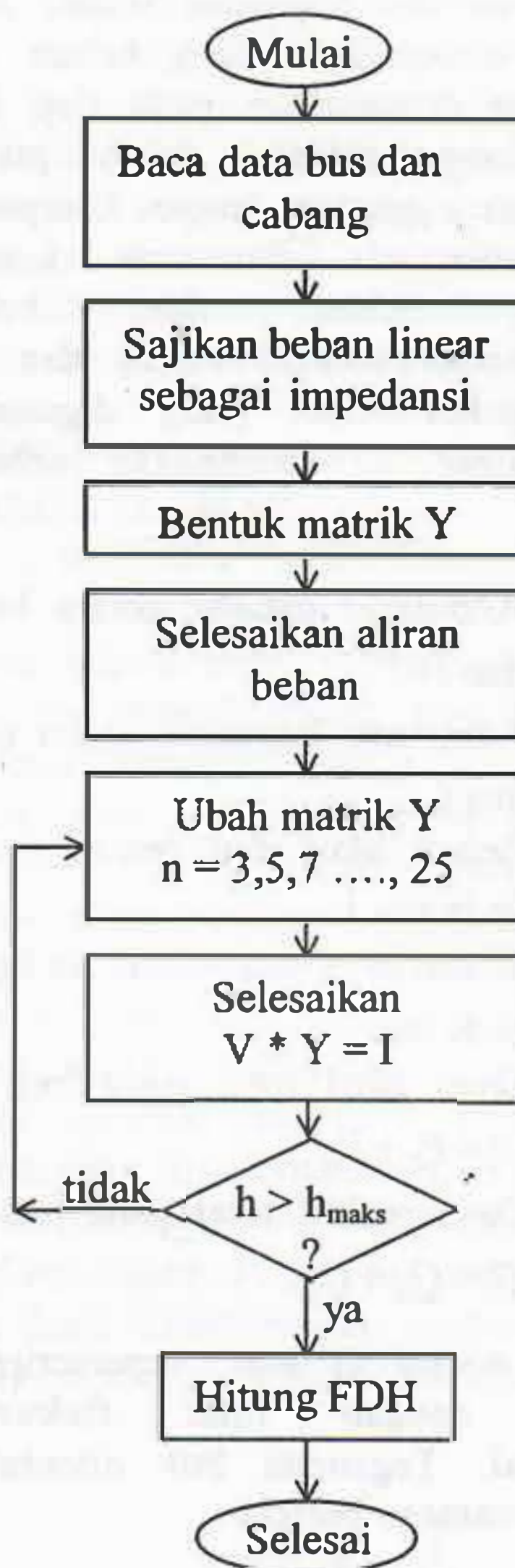
N merupakan batas orde harmonik yang dipertimbangkan dan diinginkan supaya berada dalam batas-batas yang dapat diterima. Faktor Distorsi Harmonik (FDH) dalam bentuk gelombang tegangan dinyatakan sebagai :

$$FDH(\%) = \left[\left(\sum_{n=2}^N |V_i^n|^2 \right)^{1/2} / |V_i^1| \right] \cdot 100\% \quad (11)$$

Faktor Distorsi Harmonik secara umum diinginkan lebih rendah nilai dari maksimum yang dapat diterima.

Fungsi sasaran dari penempatan kapasitor adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya, mempertahankan tegangan bus dan distorsi

harmonik pada batas-batas yang diijinkan dengan biaya minimum.



Gambar 2. Diagram alir program aliran beban harmonik

Berdasarkan persamaan di atas, fungsi biaya tahunan total karena pemasangan kapasitor dan rugi daya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F = K_p P_{loss} + \sum_{j=1}^m K_c(j) Q_c(j) \quad (12)$$

Fungsi sasaran pada persamaan (12) diminimalkan dengan mematuhi kekangan berikut :

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{maks} \quad (13)$$

dan

$$FDH_i \leq FDH_{maks} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

dengan

K_p : biaya daya nyata (Rp/kW)

K_c : biaya kapasitor (Rp/kVAr)

P_{loss} : rugi daya puncak total

Q_c : ukuran kapasitor

V_{min} : batas minimal tegangan bus

V_{maks} : batas maksimal tegangan bus

FDH_{maks} : batas maksimal FDH

PENDEKATAN PEMROGRAMAN DINAMIK FUZZY

Permasalahan di atas merupakan persoalan pemrograman integer non linier, yang merupakan beban komputasi yang berat, jika seluruh kombinasi dari lokasi dan ukuran kapasitor harus diperhitungkan. Dalam tulisan ini metode pemrograman dinamik fuzzy digunakan untuk menentukan lokasi optimal dari kapasitor. Dalam metode yang diusulkan ini, sebuah fungsi sasaran fuzzy dicirikan oleh himpunan fuzzy $\tilde{P}$ yang berkaitan dengan rugi-rugi daya total. Kekangan-kekangan yang membebani sistem dibagi dalam 2 kelompok. Batas-batas tegangan bus dan batas faktor distorsi harmonik diperlukan sebagai kekangan-kekangan fuzzy. Model fuzzy dynamic programming berisi fungsi sasaran fuzzy $\tilde{P}$ dan 2 kekangan fuzzy $\tilde{V}$ dan $\tilde{H}$. Keputusan fuzzy yang merupakan penempatan optimal, tentu saja harus melibatkan fungsi sasaran dan kekangan-kekangan dalam perhitungan. Dalam notasi himpunan fuzzy, himpunan fuzzy keputusan $\tilde{D}$ merupakan konfluen atau irisan antara fungsi sasaran fuzzy $\tilde{P}$ dan

kekangan-kekangan fuzzy $\tilde{V}$ dan $\tilde{H}$, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$\tilde{D} = \tilde{P} \cap \tilde{V} \cap \tilde{H} \quad (15)$$

Perlu diperhatikan bahwa operasi himpunan fuzzy, seperti operasi irisan sebagaimana persamaan (15), hanya dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi keanggotaan pada himpunan fuzzy. Dengan demikian untuk memperoleh penentuan lokasi optimal kapasitor dengan menggunakan fuzzy dynamic programming, diperlukan untuk mendefinisikan fungsi keanggotaan untuk himpunan fuzzy $\tilde{P}$, $\tilde{V}$ dan $\tilde{H}$.

Fungsi Keanggotaan Untuk Rugi Daya $\tilde{P}$

Untuk meminimumkan biaya total, dapat dilakukan dengan mengurangi rugi-rugi pada cabang dengan mendefinisikan fungsi keanggotaan untuk rugi daya. Cabang dengan rugi daya tinggi diberi nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_p$ yang rendah. Sebaliknya, cabang dengan rugi daya rendah diberi nilai keanggotaan tinggi. Sehingga fungsi keanggotaan fuzzy yang diusulkan untuk rugi daya adalah sebagai berikut :

$$\tilde{\mu}_p(i+1) = \exp[-50 w L(i) T_{Loss}] \quad i = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (16)$$

dengan

w = faktor bobot (proporsional terhadap beban daya nyata)

$L(i)$ = rugi daya nyata antara bus i dan $i+1$

T_{Loss} = rugi daya total

Fungsi Keanggotaan Untuk Deviasi Tegangan $\tilde{V}$

Untuk keperluan regulasi tegangan, didefinisikan fungsi keanggotaan untuk $\tilde{V}$ Sebuah bus dengan deviasi tegangan tinggi

diberi nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_v$ yang rendah. Sebaliknya bus dengan deviasi tegangan rendah diberi nilai keanggotaan yang tinggi. Fungsi keanggotaan yang diusulkan adalah sebagai berikut :

$$\tilde{\mu}_v = \begin{cases} 1, & \text{Jika } V_{(i)} \geq V_{\min} \\ \left[1 + 10 \left(\frac{V_{(i)} - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \right)^2 \right]^{-1}, & \text{jika } V_{(i)} < V_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

dengan :

$V_{(i)}$ = tegangan pada bus i

$V_{\min}$ = batas bawah tegangan

$V_{\max}$ = batas atas tegangan

Fungsi Keanggotaan Untuk Distorsi Harmonik, $\tilde{H}$

Kekangan lain yang diperhitungkan adalah distorsi harmonik yang minimal. Upaya untuk mengurangi distorsi harmonik total adalah dengan mendefinisikan fungsi keanggotaan fuzzy yang memberikan nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_H$ yang rendah untuk bus dengan distorsi harmonik tinggi. Sebaliknya nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_H$ yang tinggi diberikan untuk bus dengan distorsi harmonik rendah. Fungsi keanggotaan yang diusulkan adalah sebagai berikut :

$$\tilde{\mu}_H = \begin{cases} 1, & \text{jika } FDH_i \leq FDH_{\max} \\ 10N_{(i)} \frac{FDH_{\max} - FDH_i}{FDH_{\max}}, & \text{jika } FDH_i > FDH_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

dengan :

$FDH_{\max}$: batas maksimal faktor distorsi harmonik

FDH_i : faktor distorsi harmonik pada bus i

$N_{(i)}$: persentase beban non linear bus i

Algoritma Keseluruhan Fuzzy Dynamic Programming

Pada akhirnya, 3 fungsi keanggotaan dikombinasikan untuk membentuk keputusan $\tilde{D}$ untuk setiap bus yang diuji. Nilai keanggotaan untuk keputusan fuzzy

$\tilde{D}$, yang merupakan irisan dari himpunan-himpunan fuzzy $\tilde{P}$, $\tilde{V}$ dan $\tilde{H}$, dapat ditentukan. Keputusan fuzzy, dengan demikian adalah suatu nilai yang mempunyai nilai keanggotaan terendah dalam $\tilde{D}$. Jadi permasalahan pada akhirnya dapat diformulasikan sebagai upaya untuk memperoleh nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_D$ yang terendah, sebagaimana diberikan persamaan berikut :

$$\tilde{\mu}_D(i) = \min \{ \tilde{\mu}_P(i), \tilde{\mu}_V(i), \tilde{\mu}_H(i) \}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (19)$$

dengan :

$\tilde{\mu}_D(i)$: nilai keanggotaan pada himpunan fuzzy $\tilde{D}$

$\tilde{\mu}_P(i)$: nilai keanggotaan untuk rugi daya pada bus i

$\tilde{\mu}_V(i)$: nilai keanggotaan untuk deviasi tegangan pada bus i

$\tilde{\mu}_H(i)$: nilai keanggotaan untuk distorsi harmonik pada bus i

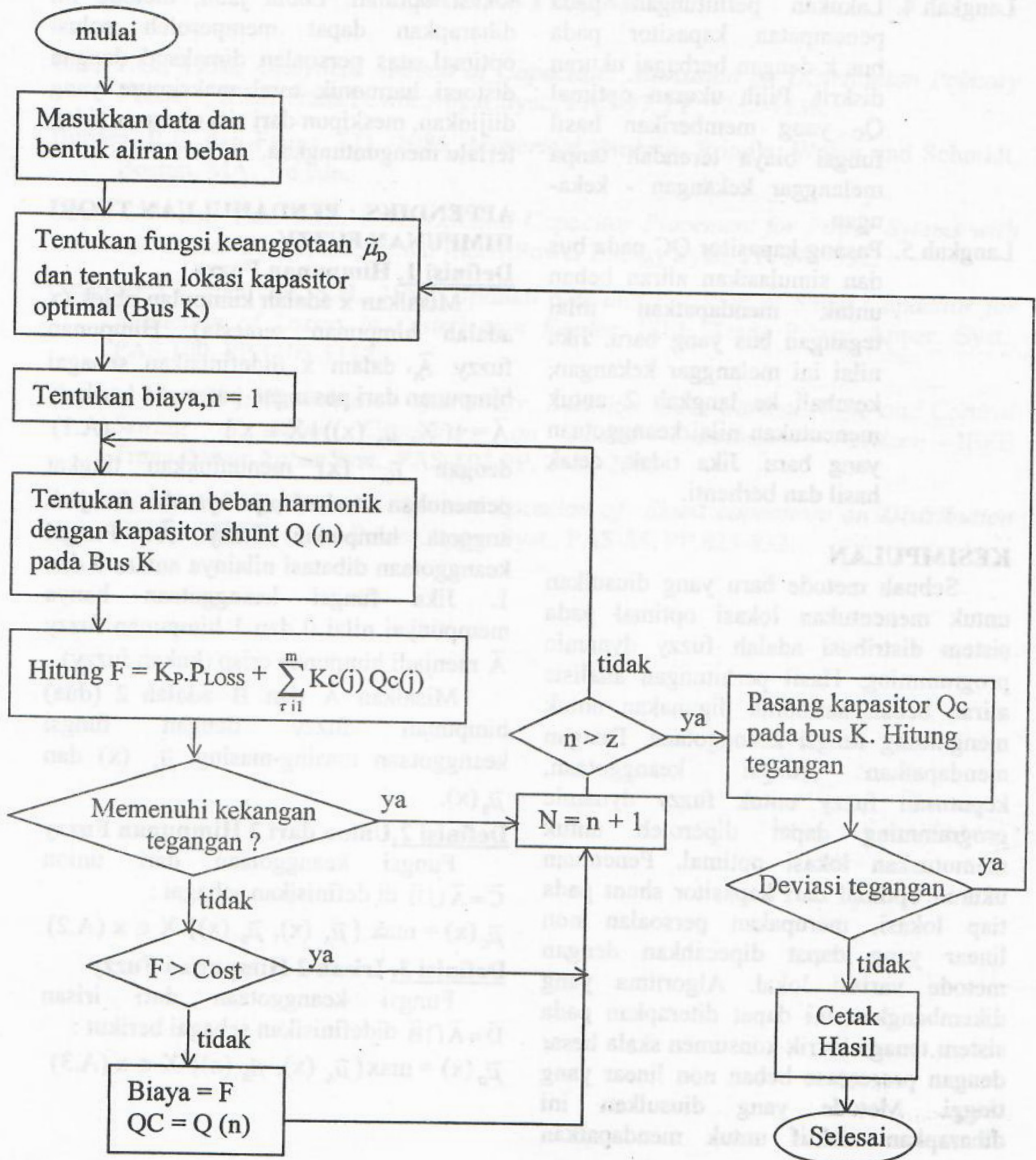
Algoritma keseluruhan untuk perhitungan dengan fuzzy dynamic programming yang diusulkan adalah sebagaimana diagram alir pada Gambar 3.

Adapun tahap-tahap perhitungannya adalah sebagai berikut :

Langkah 1. Buat program aliran beban pada frekwensi fundamental untuk meng-hitung tegangan bus

Langkah 2. Tentukan fungsi keanggotaan $\tilde{\mu}_P$, $\tilde{\mu}_V$, $\tilde{\mu}_H$ dan $\tilde{\mu}_D$ untuk himpunan-himpunan fuzzy $\tilde{P}$, $\tilde{V}$, $\tilde{H}$ dan $\tilde{D}$

Langkah 3. Identifikasi lokasi optimal dari kapasitor shunt pada bus dengan nilai keanggotaan $\tilde{\mu}_D$ terendah. Misalkan terjadi pada bus K, $\tilde{\mu}_D(K)^*$



Gambar 3. Algoritma fuzzy dynamic programming
(n = tahapan diskrit pada ukuran kapasitor; z = tahapan maksimum pada ukuran kapasitor)

Langkah 4. Lakukan perhitungan pada penempatan kapasitor pada bus k dengan berbagai ukuran diskrit. Pilih ukuran optimal Q_c yang memberikan hasil fungsi biaya terendah tanpa melanggar kekangan - kekangan.

Langkah 5. Pasang kapasitor QC pada bus dan simulasikan aliran beban untuk mendapatkan nilai tegangan bus yang baru. Jika nilai ini melanggar kekangan, kembali ke langkah 2 untuk menentukan nilai keanggotaan yang baru. Jika tidak, cetak hasil dan berhenti.

KESIMPULAN

Sebuah metode baru yang diusulkan untuk menentukan lokasi optimal pada sistem distribusi adalah fuzzy dynamic programming. Hasil perhitungan analisis aliran beban harmonik digunakan untuk menghitung fungsi keanggotaan. Dengan mendapatkan fungsi keanggotaan, keputusan fuzzy untuk fuzzy dynamic programming dapat diperoleh untuk memutuskan lokasi optimal. Penentuan ukuran optimal dari kapasitor shunt pada tiap lokasi, merupakan persoalan non linear yang dapat dipecahkan dengan metode variasi lokal. Algoritma yang dikembangkan ini dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik konsumen skala besar dengan presentase beban non linear yang tinggi. Metode yang diusulkan ini diharapkan efektif untuk mendapatkan

lokasi optimal. Lebih jauh, metode ini diharapkan dapat memperoleh solusi optimal atas persoalan dimaksud dengan distorsi harmonik total maksimum yang diijinkan, meskipun dari sisi ekonomi tidak terlalu menguntungkan.

APPENDIKS : PENDAHULUAN TEORI HIMPUNAN FUZZY

Definisi 1. Himpunan Fuzzy

Misalkan x adalah kumpulan objek (x adalah himpunan semesta). Himpunan fuzzy $\tilde{A}$ dalam x didefinisikan sebagai himpunan dari pasangan-pasangan berikut: $\tilde{A} = \{ (X, \tilde{\mu}_A(x)) \mid X \in x \}$ (A.1) dengan $\tilde{\mu}_A(x)$ menunjukkan tingkat pemenuhan x terhadap persyaratan menjadi anggota himpunan fuzzy $\tilde{A}$. Fungsi keanggotaan dibatasi nilainya antara 0 dan 1. Jika fungsi keanggotaan hanya mempunyai nilai 0 dan 1 himpunan fuzzy $\tilde{A}$ menjadi himpunan crisp (bukan fuzzy).

Misalkan $\tilde{A}$ dan $\tilde{B}$ adalah 2 (dua) himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan masing-masing $\tilde{\mu}_A(x)$ dan $\tilde{\mu}_B(x)$.

Definisi 2. Union dari 2 Himpunan Fuzzy

Fungsi keanggotaan dari union $\tilde{C} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ di definisikan sebagai :

$$\tilde{\mu}_C(x) = \max \{ \tilde{\mu}_A(x), \tilde{\mu}_B(x) \} \quad X \in x \quad (A.2)$$

Definisi 3. Irisan 2 Himpunan Fuzzy

Fungsi keanggotaan dari irisan $\tilde{D} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ didefinisikan sebagai berikut :

$$\tilde{\mu}_D(x) = \min \{ \tilde{\mu}_A(x), \tilde{\mu}_B(x) \} \quad X \in x \quad (A.3)$$

DAFTAR PUSTAKA

- Bae, Y.G., 1978, *Analytical Method of Capacitors Allocation on Distribution Primary Feeders*, IEEE Trans.Power.Appar.Syst., PAS-97, PP. 1232-1238.
- Burden, R.L. dan Faires, J.D., 1985, *Numerical Analysis*, Prindle, Weber and Schmidt, Boston, MA, 3rd edn.
- Chen, C.S. dan Yan, Y.H., 1992, *Optimal Capacitor Placement for Power Sytems with non Linear Loads*, Int.Journal Electr.Power Energy Syst., PP. 381-392.
- Grainger J.J., dan Lee, S.H., 1981, *Optimal Size and Location of Shunt Capacitor for Reduction of Losses in Distribution Feeder*, IEEE Trans Power Appar. Syst., PAS.100, PP.1105-1118.
- Kaplan, M., 1984, *Optimization of Number, Location, Size, Control, Type and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders*, IEEE Trans.Power.Appar.Syst., PAS-103 PP. 2659-2665.
- Schmill, J.V., 1965, *Optimum size and Location of Shunt capacitors on Distribution Feeders*, IEEE, Trans.Power.Appar.Syst., PAS-84, PP.825-832.