STUDI PERHITUNGAN NILAI GELOMBANG HARMONIK PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Sapto Nisworo
Fakultas Teknik Elektro Universitas Tidar Magelang

ABSTRACT

The use of electic energy is really needed by the modern society. The quality of electic power consists of suspense, current and the availability of the electric current becomes the main goal. Electric energy system that is connected to non linear devices, electric power transformer, electric motor, electric weld device becomes the couse of harmonious waves. With the accumulation of harmonious waves in the electric power system couses mis-measurement, disruption of electrical service and een tends to break the devices, especially digital devices.

Keywords : electric energy, harmonious study.

A. PENDAHULUAN

Energi memegang peranan penting dalam pengembangan ekonomi. Bahkan energi itu dapat dianggap sebagai darah kehidupan ekonomi. Dengan sendirinya banyak sekali perencanaan dilakukan, baik waktu lampau maupun sekarang dan diperlukan implementasi secara besar-besaran dari rencana-rencana itu untuk memungkinkan penyediaan energi secara mudah. Energi yang paling umum digunakan adalah energi listrik.

Kebutuhan biaya yang terdapat pada sistem penyaluran distribusi energi listrik merupakan bagian dari permasalahan pelayanan daya listrik agar pelayanan daya listrik tersebut menjadi berkualitas. Salah satu kegiatan yang dilakukan dalam mewujudkan keberhasilan permasalahan ini adalah proses menentukan kapan dan letak peralatan dapat dinon-operasikan untuk keperluan pemeliharaan. Salah satu sebab peralatan tersebut harus dirawat adalah terjadinya pengaruh harmonik terhadap jaring daya selama operasi yang harus ditiadakan. Apabila hal ini dilakukan hal ini pasti memerlukan biaya yang harus ditanggung oleh produsen dan konsumen secara bersama-sama, untuk itu

diperlukan perhitungan dan pengukuran teoritis dari kontrol pembagian biaya akibat pengaruh harmonik di antara pengganggu utama pada suatu jaring.

Permasalahan yang timbul dan diteliti adalah upaya membagi secara proporsional terhadap pembiayaan yang terjadi akibat penurunan kinerja peralatan yang dilaksanakan untuk keperluan perawatan. Konsep yang diusulkan nantinya adalah konsep yang memungkinkan mengembangkan instrumentasi, pengukuran dan kalkulasi yang tertuju pada distribusi yang adil dari biaya yang menutupi biaya peralatan dan usaha yang diperlukan untuk pemeliharaan jaring daya yang bebas pengaruh harmonik.

Masalah yang akan dikemukakan hanya menyangkut bagaimana membagi efek yang terjadi akibat arus harmonik I_{Ch} disebabkan oleh beban-beban non linear pada komponen yang ditinjau secara teoritis. Belum menyangkut rugi-rugi tambahan yang disebabkan oleh harmonic tegangan pada inti magnetik, seperti trafo dan motor secara matematis. Dengan distorsi harmonic total tegangan, $THD_v < 0,1$.

Sebelumnya telah dilakukan penelitian yang pembahasannya berhubungan dengan pengukuran pengaruh harmonik terhadap sistem daya listrik :

- *A General Formula for Prediction of Iron Losses under Noninusiodal Forms*. Oleh Amar M dan Kaczmareck R pada tahun 1995 ;
- *Measuring Procedure for the Evaluation of the Harmonic Impact of a Single Disturbing Load*. Oleh Bellon A dan Pincella C pada tahun 1994 ;
- *On the Assesment of Harmonic Pollution*. Oleh Emanuel A.E pada tahun 1995 ;
- *Harmonica State Estimation of Power System : Theory and Implementation* oleh Arrilaga Z. P. Du. J., Watson N dan Chen S pada tahun 1997.

Berdasarkan penelusuran literatur tersebut, maka pada kesempatan ini akan dilakukan penelitian tentang bagaimana membagi efek yang disebabkan oleh harmonik terhadap beban-beban secara proporsional, dan ini pada akhirnya akan mempengaruhi biaya yang harus ditanggung oleh konsumen pada sisi beban. Jadi konsep yang akan diteliti dan model yang digunakan berbeda dengan peneliti sebelumnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi operasi yang optimum dalam hal ini adalah dapat membagi pengaruh yang ditimbulkan oleh arus harmonik atau tegangan harmonik terhadap beban-beban sehingga nantinya tidak terjadi pembengkakan atau pelimpahan ke suatu beban tertentu saja

pengaruh dari harmonik tersebut yang akan mengakibatkan kerusakan pada beban tersebut.

Penelitian ini difokuskan untuk menerapkan suatu pertimbangan teoritis terhadap pengukuran pengaruh harmonik tersebut. Jadi pada akhirnya nanti akan didapatkan suatu formula yang tepat untuk menyelesaikan masalah pembagian pengaruh harmonik ke seluruh beban-beban secara proporsional.

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi suatu operasi sistem tenaga listrik dalam hal ini kondisi yang dapat membagi pengaruh-pengaruh yang timbul akibat harmonik terhadap beban-beban yang ada pada sistem tenaga listrik untuk suatu kondisi beban yang non linear yang sudah barang tentu menimbulkan pengaruh harmonik tersebut. Di samping itu penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu acuan dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, juga sebagai sumbangan literatur dalam bidang teknik kelistrikan dalam menangani masalah harmonik dalam sistem tenaga listrik.

Tinjauan Pustaka

Menurut Amar M dan Kaczmareck R. (1995) membuat suatu formula yang umum untuk memprediksikan rugi-rugi inti besi di bawah kondisi bentuk tegangan dan arus yang non sinusiodal yang disebabkan komponen non linear, sedang menurut Bellon A dan Pincella C (1994) membuat suatu prosedur pengukuran untuk mengevaluasi pengaruh harmonik yang kuat dari suatu beban gangguan tunggal dan Emanuel A. E (1995) melakukan suatu penelitian dan membuat suatu formula yang dapat menaksir atau menilai berapa besar pengaruh harmonik yang ditimbulkan oleh sumber-sumber harmonik terhadap sistem tenaga listrik, perhitungan untuk dapat mengetahui bentuk dan nilai keadaan harmonik yang timbul pada suatu sistem tenaga listrik yang mengganggu kestabilan sistem atau tidak. Arrillaga Z. P. Du., Watson N dan Chen S (1997).

Landasan Teori

Suatu prosedur yang sangat membantu dalam beberapa masalah pada analisis jaring adalah persamaan jaring. Untuk mengerti pengertian dari koefisien-koefisien yang dipakai dalam perhitungan nantinya kita harus berhubungan dengan ekspresi dasar matrik yang ditulis untuk urutan harmonik ke-h (subskrip h dihilangkan).

$[Z][I]=[V]$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = [V] \qquad (1)$$

Dengan [Z], [I[dan [V] adalah matrik impedans bus, dan vektor arus bus dan tegangan bus dari harmonik urutan ke-*hi.*

Jika beberapa komponen dihubungkan antara node p dan q, tegangan melewati komponen ini adalah :

$$V_{pq} = Z_{pq}I_{pq} = V_p - V_q \qquad (2)$$

dari (1) menghasilkan

$$\begin{aligned} V_p &= Z_{p1}I_1 + Z_{p2}I_2 + \ldots + Z_{pn}I_n \\ V_q &= Z_{q1}I_1 + Z_{q2}I_2 + \ldots + Z_{qn}I_n \end{aligned} \qquad (3)$$

dan phasor arus harmonik yang mengalir dari p ke q adalah :

$$I_{pq} = I_{CH} = \frac{V_{ph} - V_{qh}}{Z_{pq}}$$

$$I_{pq} = \frac{(Z_{p1} - Z_{q1})I_1 + (Z_{p2} - Z_{q2})I_2 + \ldots + (Z_{pn} - Z_{qn})I_n}{Z_{pq}}$$

$$I_{pq} = \alpha_{c1}I_1 + \alpha_{c2}I_2 + \ldots + \alpha_{cn}I_n \qquad (4)$$

karena itu :

$$\alpha_{cn} = \frac{Z_{pn} - Z_{qn}}{Z_{pq}} \qquad (5)$$

Beberapa impedans cabang tetap konstan tidak berubah terhadpa waktu dan nilainya telah diketahui layak dan baik, impedans yang lain bervariasi terhadap waktu dan telah dihitung dari pengukuran tegangan dan arus, sebagai ilustrasi bahwa $Z_{pq} = (V_p - V_q) / I_{pq}$

Arus bolak-balik non sinusiodal

$$i = \sum_h \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \beta h); \quad \omega = 2\pi f \qquad (6)$$

Aliran yang melalui peralatan menyebabkan efek samping yang tidak cocok. Kepelikan pada efek ini tergantung dari karakteristik dari peralatan dan tipe dari gangguan pada elektromagnetik. Sebagai contoh, rugi-rugi tambahan ΔP_R yang disebabkan harmonic di dalam konduktor atau lilitan adalah :

$$\Delta P_R = Rdc \sum_{h,h\neq 1} K_h I_h^2 \qquad (7)$$

Dengan R_{dc} adalah hambatan dc dan K_h adalah faktor pengaruh kulit penghantar.

Rugi-rugi dielektrik tambahan ΔPc di kapasitor atau kabel dengan kapasitas C dan faktor disipasi (yang menghilangkan) $\tan\delta_h$ adalah :

$$\Delta P_C = \frac{1}{\omega C} \sum_{h,h\neq 1} \frac{I_h^2}{h} \tan \delta_h \qquad (8)$$

Gangguan elektromagnetik terjadi pada jalur komunikasi dan jalur yang berbatasan dengan daya selalu diukur dengan produk *IT* [1] :

$$IT = \sqrt{I_1 T_1 + \sum_{h\neq 1} (I_h T_h)^2} \qquad (9)$$

Dengan T_h merupakan faktor berat gangguan telepon (TIF).

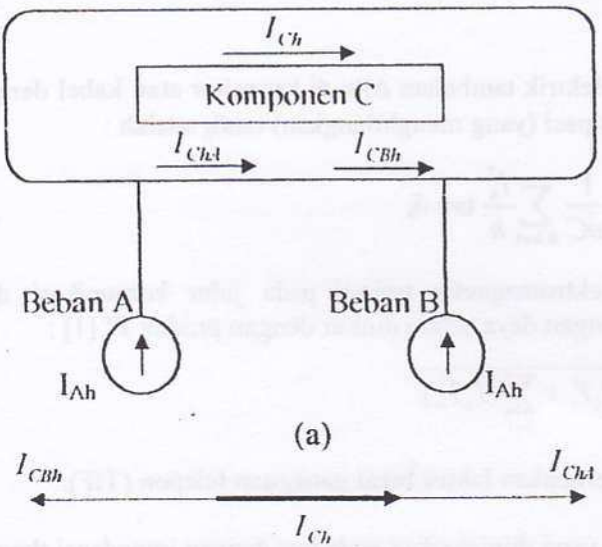
Ketika arus i yang diinjeksikan pada bus dengan impedansi thevenin Z_{THh}, total distorsi harmonik dari tegangan adalah :

$$THD_v = \frac{1}{V_1}\sqrt{\sum_{h,h\neq 1}(Z_{THh}I_h)^2} \qquad (10)$$

telah diketahui bahwa biaya ξ dari efek yang akan dikurangi akibat arus harmonic mungkin diekspresikan sebagai fungsi dari pertambahan jumlah kandungan harmonic-harmonic dan dinyatakan :

$$\xi = F\left[\sum_{h,h\neq 1}(\omega_h I_h)^2\right] = F\left(\sum_{h,h\neq 1}\psi_h\right) \; ; \; \psi_h = (\psi_h I_h)2 \qquad (11)$$

Dengan ω_h adalah faktor berat tergantung dari urutan harmonic h dan tipe dari peralatan yang dirusak harmonic, merupakan karakteristik fisik dan geometri. Persamaan (11) ini secara matematis tidak memasukkan rugi-rugi tambahan yang disebabkan oleh harmonik tegangan pada inti magnetik dengan distorsi harmonik total dari tegangan $THD_v < 0{,}1$ dan rugi-rugi inti tambahan diabaikan.



Gambar 1. (a) suatu jaring daya listrik dengan dua beban non linear, (b) komponen I_{Ch}, I_{CAh} dan ICBh yang menghasilkan sudut phasa 180°.

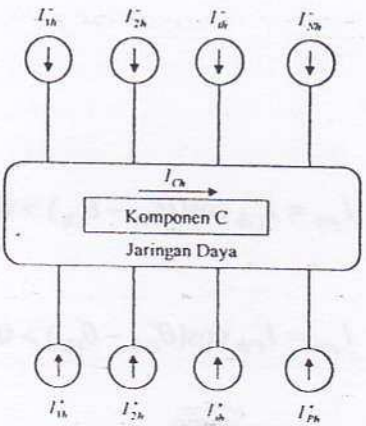
Gambar 1, menggambarkan suatu jaring dengan 2 beban non linear A dan B, dan akan membantu penjelasan tentang pendekatan dasar yang diusulkan paper ini. Dua beban A dan B sama dengan grup dari beban P dan N. Dua phasor arus I_{CAh} dan I_{CBh} dikontribusikan oleh sumber arus harmonik I_{Ah} dan I_{Bh}. Juga dapat diasumsikan bahwa I_{CAH} dan I_{CBh} adalah berbeda phasa 180°, gambar 1(b) disebabkan oleh :

$$I_{Ch} = I_{CAh} - I_{CBh} \qquad (12)$$

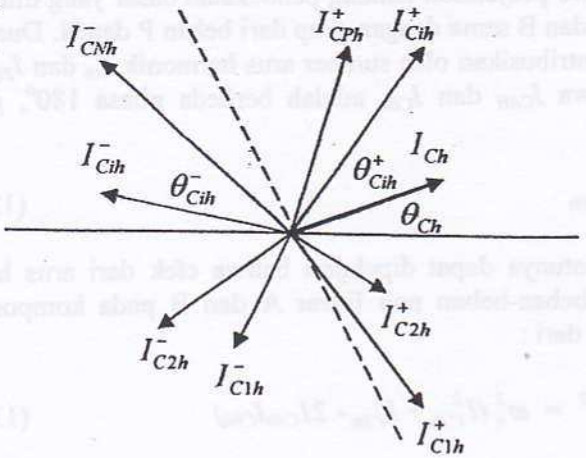
Dari (11) salah satunya dapat dipelajari bahwa efek dari arus harmonik I_{Ch} disebabkan oleh beban-beban non linear A dan B pada komponen C yang merupakan fungsi dari :

$$\psi h = (\omega_h I_{Ch})^2 = \omega_h^2 (I_{CAh}^2 + I_{CBh}^2 - 2 I_{CAh} I_{CBh}) \qquad (13)$$

Dua tipe yang jelas dari kontribusi yang diobservasi pada (13) adalah tunggal dan gabungan. Kontribusi tunggal adalah $\omega_h^2 I_{CAh}^2$ (dibuat oleh beban A) dan $\omega_h^2 I_{CBh}^2$ (dibuat oleh beban B) dan langsung dialokasikan pada beban-beban yang bersangkutan. Yang kurang jelas adalah alokasi dari kontribusi gabungan $-2\omega_h^2 I_{CAh} I_{CBh}$, antara beban A dan B



Gambar 2. Jaring daya dengan M = P + N beban-beban non linear



Gambar 3. Phasor-phasor yang didistribusikan dengan beban-beban non linear M = P + N

Arus total harmonik memiliki nilai rms :

$$I_{Ch} = I_{Ph} - I_{Nh} \tag{15}$$

Dengan :

$$I_{Ph} = \sum_{i=1}^{p} I_{pih} \; ; \qquad I_{pih} = I^+_{Cih} \cos(\theta^+_{Cih} - \theta_{Ch}) > 0 \tag{16}$$

$$I_{Ph} = \sum_{i=1}^{p} I_{pih} \; ; \qquad I_{pih} = I^-_{Cih} \cos(\theta^-_{Cih} - \theta_{Ch}) > 0 \tag{17}$$

Satu term $A_h I_{Ph}^2$ akibat beban non linear P dan $B_h I_{Nh}^2$ akibat beban non linear N, seperti :

$$I_{Ch}^2 = I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2 - 21_{Ph} I_{Nh} = A_h I_{Ph}^2 + B_h I_{Nh}^2 \qquad (18)$$

Dalam hal ini kontribusi gabungan $-21_{Ph}I_{Nh}$ suatu bagian yang proporsional dengan $I_{Ph}^2/(I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2)$ dialokasikan ke beban A dan sisanya, yang proporsional dengan $I_{Nh}^2/(I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2)$ dialokasikan ke beban B, menghasilkan :

$$A_h = B_h = 1 - \frac{2I_{Ph}I_{Nh}}{I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2} \qquad (19)$$

Langkah terakhir adalah untuk menentukan divisi dari term $A_h I_{Ph}^2$ sepanjang beban non linear P dan $B_h I_{Nh}^2$ sepanjang beban non linear N. Ini dilakukan dengan ekspresi :

$$I_{Ph}^2 = \left(\sum_{i=1}^{p} I_{pih} \right)^2$$

$$I_{Ph}^2 = \sum_{i-1}^{p} \left(I_{pih}^2 + 21_{pih} \sum_{\substack{i=1 \\ f \neq 1}}^{p} I_{pjh} \right) = \sum_{i=1}^{p} \underline{I_{pih}^2} \qquad (20)$$

Dengan kontribusi dari masing-masing beban linear dari group P positif adalah :

$$\underline{I_{pih}^2} = I_{pih}^2 + 2I_{pih} \sum_{\substack{i=1 \\ f \neq 1}}^{p} a_{pijh} I_{pjh} \qquad (21)$$

$$a_{pijh} = \frac{I_{pih}^2}{I_{pih}^2 + I_{pjh}^2} \tag{22}$$

Koefisien a_{pijh} dihitung dengan menggunakan metode I_{th}^2. Term $\underline{I_{pih}^2}$ adalah sama dengan arus kwadrat yang berisikan beban *i's* kontribusi individual I_{pih}^2 dan terdiri dari seluruh kontribusi gabungan yang disebabkan oleh interaksi antara I_{pih} dan I_{pjh}. Grup negatif N dialokasikan pada cara yang sama :

$$I_{Nh}^2 = \sum_{i=1}^{N} \underline{I_{nih}^2} \tag{23}$$

$$\underline{I_{nih}^2} = I_{nih}^2 + 2I_{nih} \sum_{\substack{i=1 \\ f \neq 1}}^{N} \alpha_{nijh} I_{njh} \tag{24}$$

$$b_{pijh} = \frac{I_{pih}^2}{I_{pih}^2 + I_{pjh}^2} \tag{25}$$

Dari (11) hasilnya menunjukkan efek dari seluruh urutan arus-arus harmonik *h* pada komponen C adalah fungsi dari penjumlahan :

$$\sum_{h,h\neq 1} \omega_h^2 I_{Ch}^2 = \sum_{h,h\neq 1} \omega_h^2 \left[A_h \sum_{i=1}^{P} \underline{I_{pih}^2} + B_h \sum_{i=1}^{P} \underline{I_{nih}^2} \right]$$

$$\sum_{h,h\neq 1} \omega_h^2 I_{Ch}^2 = \sum_{i=1}^{P} \sum_{h,h\neq 1} \omega_h^2 A_h \underline{I_{pih}^2} + \sum_{i=1}^{N} \sum_{h,h\neq 1} \omega_h^2 B_h \underline{I_{nih}^2} \tag{26}$$

Berikutnya adalah untuk rugi-rugi energi tambahan, untuk interval waktu dari τ jam, biaya dari rugi-rugi energi akibat aliran arus harmonik melalui komponen C dengan tahanan dc R_{dc} adalah :

$$\xi_C = \sum_{i=1}^{P} \xi_{Pi} + \sum_{i=1}^{N} \xi_{Ni} \qquad (27)$$

Dari (2) hasilnya menunjukkan biaya dari kehilangan energi akibat harmonik yang diinjeksikan oleh beban non linear *I* pada group P adalah :

$$\xi_{Pi} = ER_{dc} \int_0 \left(\sum_{h,h\neq 1} K_h A_h \underline{I_{pih}^2} \right) dt \qquad (28)$$

Dan untuk beban ke-i pada grup N adalah :

$$\xi_{Pi} = ER_{dc} \int_0 \left(\sum_{h,h\neq 1} K_h B_h \underline{I_{nih}^2} \right) dt \qquad (29)$$

dengan E adalah biaya tambahan energi dalam \$/kWh.
Untuk biaya penurunan (peringanan) perlengkapan, menurut Kimbark [5], rating dari filter pasif dengan kapasitans C adalah :

$$S_1 + \sum_{h,h\neq 1} \frac{I_{Fh}^2}{h\omega C} \qquad (30)$$

dengan S_1 adalah ukuran kapasitor dan I_{Fh}^2 adalah arus harmonik filter dari urutan *h*. Jika filter dipasang oleh perlengkapan, maka dititik beratkan oleh beban non linear M = P + N, cukup masuk akal untuk membagi biaya filter sesuai penggunaannya oleh masing-masing beban individu. Term $\sum_{h,h\neq 1} I_{Fh}^2 / h\omega C$ dapat dipandang sebagai komponen M = P + N.
Untuk interval waktu τ jam, penggunaan total dari filter adalah dengan proporsional :

$$\int_0 \sum_{h,h\neq 1} \frac{I_{Fh}^2}{h} dt; \qquad I_{Fh}^2 = A_h \sum_{i=1}^{P} \underline{I_{pih}^2} + B_h \sum_{i=1}^{P} \underline{I_{nih}^2} \qquad (31)$$

Kegunaan filter oleh beban non linear *i* pada grup P adalah sesuai dengan :

$$\int \frac{1}{h} A_h I_{pih}^2 dt \qquad (32)$$

Jika biaya tahunan dari modal adalah ACC, biaya dari filter yang dialokasikan untuk beban non linear *i* untuk τ jam adalah :

$$\xi_{pi} = (ACC)\frac{\tau}{8760}\frac{\int \sum_{h,h\neq 1} \frac{A_h I_{pih}^2}{h} dt}{\int \sum_{h,h\neq 1} \frac{I_{Fh}^2}{h} dt} \qquad (33)$$

B. METODOLOGI PENELITIAN

a. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- data jaring tenaga listrik ;
- data beban pada jaring tenaga listrik yaitu beban-beban non linear yang terkandung ;
- data kapasitor bank yang terpasang pada jaring.

b. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Satu unit komputer yang IP IV/3 Giga yang dilengkapi hard disk 200 GB, CD/RW drive dan RAM minimal 512 MB ;
- Software untuk analisis adalah MATLAB (untuk mendapatkan solusi permasalahan) dan EDSA (untuk mendapatkan data operasi jaring antara lain arus dan tegangan dan membuat simulasi jaring tenaga listrik), EMPT (untuk simulasi program).

c. Urutan kerja penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi program. Program yang dipakai oleh penulis yang sebenarnya tidak diketahui. Tetapi apabila dilakukan sendiri dengan metode ini mungkin dapat dilakukan dengan menggunakan

program yang tertera pada alat yang digunakan. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- melakukan *running* program untuk menampilkan gelombang harmonik yang muncul pada sistem ;
- menghitung efek dari arus harmonik yang ditimbulkan dengan rumus :

$$\psi_h = (\omega_h I_{Ch})^2 = \omega_h^2 (I_{CAh}^2 + I_{CBh}^2 - 2 I_{CAh} I_{CBh}) \ ;$$

- menghitung nilai total harmonik melalui rata-ratanya, dan akan menghasilkan $I_{Ch} = I_{Ph} - I_{Nh}$ dengan :

$$I_{Ph} = \sum_{i=1}^{p} I_{pih} \ ; \qquad I_{pih} = I_{Cih}^{+} \cos(\theta_{Cih}^{+} - \theta_{Ch}) > 0$$

$$I_{Ph} = \sum_{i=1}^{p} I_{pih} \ ; \qquad I_{pih} = I_{Cih}^{-} \cos(\theta_{Cih}^{-} - \theta_{Ch}) > 0$$

- melakukan pengalokasian dari sisa unit gabungan terhadap beban-beban, dengan memakai metode proporsional I_{ih}^2
- menghitung A_h dan B_h dengan menggunakan rumus

$$A_h = B_h = 1 - \frac{2 I_{Ph} I_{Nh}}{I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2} \ ;$$

- menentukan bagian dari $A_h I_{Ph}^2$ sepanjang beban non linear P dan $B_h I_{Nh}^2$ sepanjang beban non linear N ;
- menentukan koefisien *a* dan koefisien *b* dengan menggunakan rumus :

$$a_{pijh} = \frac{I_{pih}^2}{I_{pih}^2 + I_{pjh}^2} \quad \text{dan} \quad b_{pijh} = \frac{I_{pih}^2}{I_{pih}^2 + I_{pjh}^2} \ ;$$

- menghitung untuk menunjukkan efek dari seluruh urutan arus-arus harmonik *h* pada komponen C sebagai fungsi dari penjumlahan :

$$\sum_{h,h\neq 1}\omega_h^2 I_{Ch}^2 = \sum_{i=1}^{P}\sum_{h,h\neq 1}\omega_h^2 A_h \underline{I_{pih}^2} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{h,h\neq 1}\omega_h^2 B_h \underline{I_{nih}^2}$$

- menghitung biaya dari kehilangan energi akibat harmonik yang diinjeksikan oleh beban non linear ke-i dengan rumus :

$\xi_{Pi} = ER_{dc}\int_0\left(\sum_{h,h\neq 1} K_h A_h \underline{I_{pih}^2}\right)dt$ untuk group P dan

$\xi_{Pi} = ER_{dc}\int_0\left(\sum_{h,h\neq 1} K_h B_h \underline{I_{nih}^2}\right)dt$ untuk group N ;

- pemasangan filter pada sistem ;
- menghitung penggunaan total filter dalam interval waktu τ jam dengan rumus : $\int_0 \sum_{h,h\neq 1}\frac{I_{Fh}^2}{h}dt$; $I_{Fh}^2 = A_h\sum_{i=1}^{P}\underline{I_{pih}^2} + B_h\sum_{i=1}^{P}\underline{I_{nih}^2}$
- terakhir menghitung biaya filter yang dialokasikan untuk beban non linear ke-i untuk waktu τ jam dengan memasukkan biaya investasi dengan rumus : $\xi_{pi} = (ACC)\frac{\tau}{8760}\frac{\int_0\sum_{h,h\neq 1}\frac{A_h\underline{I_{pih}^2}}{h}dt}{\int_0\sum_{h,h\neq 1}\frac{I_{Fh}^2}{h}dt}$
- maka dapatlah pembagian biaya kontrol pengaruh harmonik di antara pengganggu utama pada suatu jaring daya dengan beban non lienar

d. Metode Pengumpulan Data

Metode yang dilakukan dalam hal pengumpulan data yang dibutuhkan untuk penilaian ini adalah dengan cara me-*running*- simulasi program. Setelah itu dengan mengikuti urutan sebagai berikut :

- menentukan arus harmonik yang ditimbulkan oleh kapasitor pada setiap beban I_{Cih} melalui hasil yang didapatkan dari *running* program tersebut ;
- mengasumsikan ω_h dari gelombang harmonik melalui hasil yang didapatkan dari *running* program tersebut.

e. Metode Analisis Data

Metode yang dipakai pada penelitian ini sesuai contoh sederhana yang ditampilkan dan yang akan membantu memberikan wawasan tentang masalah ini. Misalkan $\omega_h = 1$, $I_{CAh} = 10$A, I_{CBh} hasilnya adalah :

$$\psi_h = (\omega_h I_h)^2 = (10-1)^2 = 100 + 1 - 20 = 81$$

Sangatlah jelas bahwa 100 unit dipasangkan pada beban A dan 1 unit pada beban B, dan menyisakan -20 unit gabungan yang akan diletakkan antara kedua beban tersebut. Sementara banyak cara yang mungkin untuk mengalokasikan sisa unit gabungan ini. Di sini akan diuji dengan tiga metode dasar :

- metode 50/50 : alokasi sisa unit gabungan dibagi antara dua beban A dan B, dengan demikian -10 unit dialokasikan ke beban A dan -10 unit ke beban B.
- secara proporsional dengan arus harmonik I_{CAh} dan I_{CBh} :

$$-20\frac{10}{10+1} = -18{,}18 \text{ unit untuk beban A}$$

$$-20\frac{1}{10+1} = -1{,}82 \text{ unit untuk beban B}$$

- secara proporsional dengan kwadrat arus harmonik I^2_{CAh} dan I^2_{CBh} :

$$-20\frac{100}{100+1} = -19{,}80 \text{ unit untuk beban A}$$

$$-20\frac{1}{100+1} = -0{,}20 \text{ unit untuk beban B}$$

C. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dengan $\omega_h = 1$, $I_{CAh} = 10A$, I_{CBh} hasilnya adalah tertera pada tabel 1.

Metode	Alokasi unit sisa gabungan ke masing-masing beban		Alokasi total ke masing-masing beban	
	A	B	A	B
50/50	-10	-10	90	-9
Proporsional I_{th}	-18,18	-1,82	81,82	-0,82
Proporsional I_{th}^2	-19,80	-0,20	80,20	0,80

Pada metode 50/50 dengan pengguna membagi unit gabungan dari -20 unit secara sama ke beban A dan beban B. Hasil dari pendekatan ini, bagaimanapun, tidak sebanding ; alokasi total untuk beban B adalah negatif dan sudah jauh melebihi dari kontribusi individualnya. Lebih lanjut, karena arah dari aliran daya harmonik tidak dapat digunakan sebagai suatu kriteria penentuan jika phasor arus harmonik bermanfaat atau mengganggu (oleh Bellon, A and Pincella, C), (oleh Emanuel, A.E), hasil ini tidak bisa diterima.

Metode proporsional I_{th} memiliki problem yang serupa pada alokasi dari kontribusi gabungan (oleh Emanuel A.E) ; beban A telah dimengerti sebagai pengganggu saat beban B bermanfaat.

Metode proporsional I_{th}^2 asilkan divisi yang lebih pantas dari biaya gabungan dan biaya total ; kedua penggunaan A dan B bermanfaat dari kenyataan bahwa harmonik-harmonik berbeda 180o dari phasa tanpa keterangan salah beban suatu injektor bermanfaat dari harmonik. Kedua beban adalah pengganggu ; yang satu pengganggu dominan, dan yang lain kurang berakibat.

D. SIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan dapat disimpuilkan bahwa dibutuhkan perlindungan dan pengukuran teoritis dari pembagian biaya kontrol pengaruh harmonik di antara pengganggu utama pada suatu sistem jaring daya listrik. Solusi yang diusulkan membutuhkan pengetahuan yang seksama dari topologi jaring, dan implementasinya didasari atas instrumentasi

yang menggunakan pengukuran sinkron dan simultan dari phasor arus dan phasor tegangan harmonik. Phasor I_{pih} dan I_{nih} sebagai I_{cih}, secara terus menerus dimonitor dan komponen I_{Ph}, I_{Nh}, dan A_h dihitung. Koefisien α_{cih} telah diketahui sebelumnya atau dapat diukur. Seluruh titik-titik utama, sebagai bus konsumen menengah dan besar, harus dilengkapi dengan instrumen yang secara akurat mengukur phasor arus dan tegangan harmonik dan berhubungan dengan sentral komputer.

DAFTAR PUSTAKA

Amar, M and Kaczmareck, R., 19995, *A General Formula for Prediction of Iron Losses Unter Nonsinusiodal Forms*, IEEE Trans on Magnetics, vol 31 no. 5, pp 2504-2509.

Arrilaga, J., D Bradley A and Bodger, P.S., 1985, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons Ltd, New Delhi.

Arrilaga, Z.P. Du J., Watson, N and Chen S., 1997, *Harmonic State Estimation of Power System : Theory and Implementation*, in Proceedings of IASTED, Orlando, FL., pp. 427-430.

Bellon, A and Pincella, C., 1994, *Measuring Procedure for the Evaluation of the Harmonic Impact of a Single Disturbing Load*, CIGRE 36.05, CIRED CC02.

Davis, E.J., Emanuel, A.E., and Pileggi, D.,, 1996, *Evaluation of Single-Point Measurement Method for Harmonic Pollution Cost Allocation*, Compaion Paper.

Emanuel, A.E., 1995, *On the Assesment of Harmonic Pollution*, IEEE Trnas. Power Delivery, vol 10, no. 1, pp. 351-359.

Kimbark, E.W., 1971, *Direct Current Transmission*, Wiley – Interscience, pp : 369.

Saadat, H., 1999, *Power System Analysis*, Mc Graw Hill, Singapore.

....., 1992, *IEEE Recommanded Practices for Harmonic Control in Electric Power System*, IEEE std, 519-592.