

STUDI HARMONISA PADA GARDU INDUK

Janter Napitupulu

Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Darma Agung
Jl.Dr.TD. Pardede No.21 Medan

ABSTRAK

Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul dari pengoperasian beban listrik yang sebagian besar diakibatkan oleh beban non linier, dimana akan terbentuk gelombang yang berfrekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya, sehingga bentuk gelombang arus dan tegangan yang idealnya sinusoidal akan cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi pada proses pendistribusian energi listrik ke konsumen.

Keywords: Harmonisa, Transformator

I. PENDAHULUAN

Dalam proses penyaluran energi listrik dari pembangkit ke beban akan terjadi rugi-rugi daya saluran yang besar jika daya disalurkan pada level tegangan rendah. Untuk memperkecil rugi-rugi daya penyaluran dan memaksimalkan daya yang ditransmisikan, tegangan dinaikkan pada level yang sesuai dengan daya yang disalurkan. Kemudian tegangan diturunkan lagi dengan menggunakan transformator. Oleh karena itu, transformator mempunyai peranan yang sangat penting dalam penyaluran daya listrik dari pembangkit ke beban.

Pertumbuhan beban listrik pada masa sekarang ini merupakan dampak dan pengaruh dari pertumbuhan ekonomi. Dengan pertumbuhan ekonomi yang semakin meningkat maka kebutuhan atau daya beli masyarakat terhadap beban listrik semakin meningkat pula, hal ini dapat dilihat dari semakin meningkatnya pemakaian peralatan yang menggunakan tenaga listrik. Umumnya peralatan listrik yang menggunakan komponen semikonduktor atau yang dikenal sebagai beban non linier, jenis beban ini akan membangkitkan harmonisa pada sistem penyaluran daya listrik.

II. TEORI UMUM

2.1. Rugi-rugi akibat Harmonisa pada Transformator

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan ke bebandengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus dan tegangan harmonisa secara signifikan akan menyebabkan panas lebih. Ada dua pengaruh

yang ditimbulkan panas lebih pada transformator ketika arus beban mengandung komponen harmonisa.

- a) Harmonisa arus menyebabkan meningkatnya rugi-rugi tembaga yang dinyatakan dengan:

$$P_{CU} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n$$

dengan: P_{CU} = rugi-rugi tembaga (watt)

I_n = arus pada belitan trafo (A)

R_n = resistansi belitan trafo (Ω)

- b) Harmonisa tegangan menyebabkan meningkatnya rugi-rugi besi, seperti arus pusar dan rugi-rugi *hysteresis*. *Eddy current* (arus pusar) terjadi bila inti dari sebuah material jenis ferromagnetic (besi) secara elektrik bersifat konduktif. Konsentrasi arus pusar lebih tinggi pada ujung-ujung belitan transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan yang menyebabkan fenomena terjadinya arus pusar.

Bertambahnya rugi-rugi arus pusar karena harmonisa berpengaruh pada temperatur kerjatransformator yang terlihat pada besar rugi-rugi daya nyata (watt) akibat arus pusar ini.

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2$$

dimana: h = bilangan bulat orde harmonisa

P_{EC} = rugi-rugi arus pular
 P_{EC-R} = faktor rugi-rugi arus pular
 (ANSI/IEEE Standard C57;
 $P_{EC-R} = 1\%$)
 I_h = arus rms harmonisa ke- h

2.2. Beban Listrik Pada Transformator

Didalam sistem tenaga listrik dikenal 2 (dua) jenis beban listrik yaitu: Beban listrik linier dan Beban listrik non linier.

a. Beban Listrik Linier

Beban Listrik Linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus. Beban linier merupakan beban yang mengeluarkan bentuk gelombang yang berbentuk linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan.

Pada beban linier ini, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangan yang ditimbulkannya. Bila gelombang tegangan berbentuk sinusoidal, bentuk gelombang arus juga membentuk sinusoidal.

b. Beban Listrik Non-Linier

Beban non-linier adalah beban yang mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus, sehingga bentuk gelombangnya berubah atau cacat. Beban non-linier inilah yang menimbulkan atau menghasilkan harmonisa.

Fasilitas industri modern ditandai oleh beban-beban non linier. Beban ini dapat membuat distorsi yang signifikan dari total beban fasilitas yang dapat menimbulkan arus harmonisa ke dalam sistem daya dan menyebabkan distorsi harmonisa pada tegangan. Masalah harmonisa ini dipengaruhi oleh kenyataan bahwa beban non linier ini memiliki faktor daya relatif rendah.

2.3. Efek Harmonisa Pada Transformator

Harmonisa adalah pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonisa yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonisa. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonisa keduanya

adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya.

Apabila sistem distribusi mensuplai beban non linier, dimana beban non linier menghasilkan harmonisa. Tegangan harmonisa ini mengalir dalam sistem yang akan menghasilkan susut tegangan pada impedansi sistem. Harmonisa tegangan atau arus ini akan berkombinasi dengan tegangan atau arus frekuensi fundamental dan membentuk distorsi gelombang yang terdistorsi.

1. Definisi dan Standar Harmonisa yang umum digunakan

a. Orde Harmonisa

Orde dari harmonisa merupakan perbandingan antara frekuensi harmonisa dengan frekuensi fundamental dimana:

$$h = \frac{f_h}{f_1}$$

Dengan : h = orde harmonisa
 f_h = frekuensi harmonisa ke- h
 f_1 = frekuensi fundamental

b. Spektrum

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitudo komponen harmonisa sebagai fungsi dari orde harmonisa, dan diilustrasikan menggunakan histogram. Bisa dikatakan spektrum adalah merupakan perbandingan arus atau tegangan pada frekuensi harmonisa terhadap arus atau tegangan pada frekuensi fundamental. Spektrum digunakan sebagai dasar perancangan filter untuk mengurangi harmonisa, terutama bila yang digunakan adalah filter pasif.

c. Total Harmonic Distortion (THD)

Distorsi harmonisa total disebut dengan **Total Harmonic Distortion (THD)** adalah indeks yang menunjukkan total harmonisa dari gelombang tegangan atau arus yang mengandung komponen individual harmonisa, yang dinyatakan dalam persen terhadap komponen fundamentalnya.

THD untuk gelombang tegangan adalah:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

dimana :

$$V_1 = \text{Tegangan fundamental}$$

$$V_h = \text{Tegangan harmonisa ke-}h$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots$$

THD untuk gelombang arus adalah:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

dimana :

$$I_1 = \text{Arus fundamental}$$

$$I_h = \text{Arus harmonisa ke-}h$$

$$h = 2, 3, 4, 5, \dots$$

d. Pengaruh Harmonisa terhadap rugi-rugi Daya Beban

Rugi daya beban penuh P_{LL} diperoleh dari dua komponen, yaitu rugi-rugi I^2R dan rugi-rugi arus pusing P_E :

$$P_{LL} = I^2 R + P_{EC}$$

Rugi-rugi I^2R berbanding lurus terhadap nilai rms arus. Sedangkan rugi-rugi arus pusing sebanding dengan kwadrat arus dan frekuensi, dan dapat dihitung melalui persamaan:

$$P_{EC} = K_{EC} \times I^2 \times h^2$$

dengan K_{EC} adalah konstanta sebanding. Faktor K biasanya diperoleh dari literatur *power quality* mengenai *transformer derating*

dapat dicari melalui arus harmonisa seperti persamaan berikut,

$$K = \frac{\sum (I_h^2 \times h^2)}{\sum I_h^2}$$

Hubungan antara faktor K dengan nilai rms total arus harmonisa dalam per unit ditunjukkan oleh persamaan,

$$\sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \times P_{EC-R}}} \quad (p.u)$$

dengan: P_{EC-R} = faktor rugi-rugi arus pusing

h = harmonisa ke h

I_h = arus harmonisa ke h

Untuk menghitung pengaruh harmonisa terhadap rugi-rugi daya transformator per unit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R} \quad (p.u)$$

dengan:

P_{EC-R} adalah faktor rugi-rugi arus pusing

h adalah harmonisa ke- h

I_h adalah arus harmonisa ke- h

$\sum I_h^2$ adalah merupakan komponen rugi-rugi I^2R dalam p.u, sedangkan

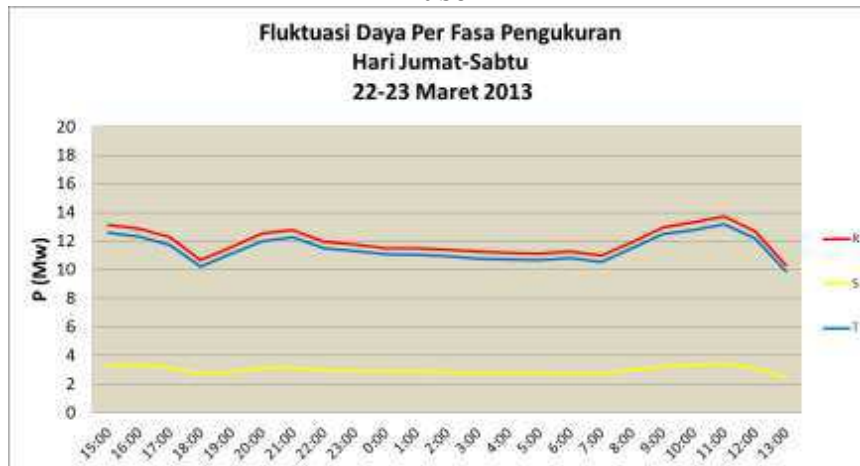
$(\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R}$ adalah merupakan komponen rugi-rugi arus pusing dalam p.u.

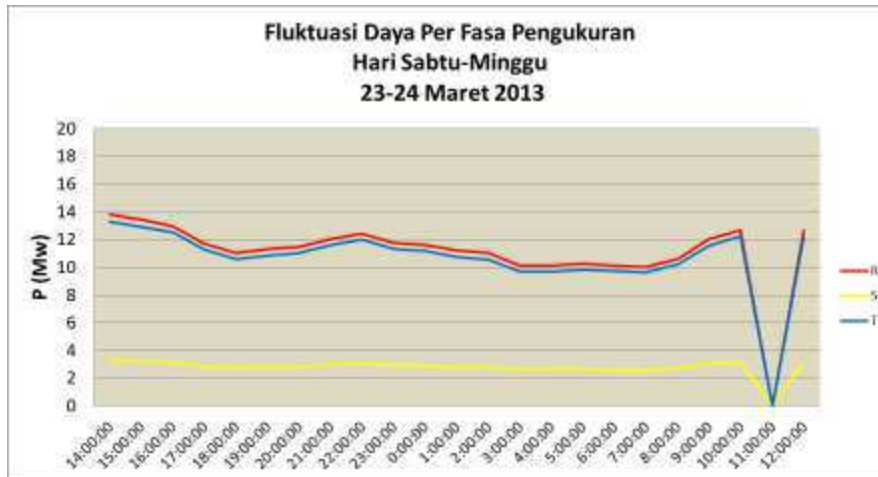
III.METODE PENELITIAN

3.1.Hasil Pengukuran Daya

Contoh hasil pengukuran daya sbb :

Tabel





3.2. Perhitungan Harmonisa

1. Perhitungan Total Distorsi Harmonisa

Distorsi harmonisa atau biasa disebut (THD) *Total Harmonic Distortion* adalah indeks yang menunjukkan total harmonisa dari gelombang arus yang mengandung

komponen individual harmonisa, dan dinyatakan dalam persen.

Untuk menyederhanakan perhitungan, nilai arus harmonisa ke h yang digunakan merupakan nilai maksimum dan rata-rata pengukuran selama satu hari.

Tabel. Hasil perhitungan THDi Tertinggi pada hari Kerja

FASA	JAM	Arus fundamental $[I_1]$	Arus Harmonisa $[I_h]$	$\sum I_h^2$	$\sqrt{\sum I_h^2}$	THD i [%]
R	3:00	2,495	0,25	0,063	0,250	10,02
S	9:00	1,909	0,40	0,160	0,400	20,95
T	3:00	2,471	0,27	0,073	0,270	10,93

Tabel. Hasil perhitungan THDi rata-rata pada hari Kerja

FASA	Arus fundamental $[I_1]$	Arus Harmonisa $[I_h]$	$\sum I_h^2$	$\sqrt{\sum I_h^2}$	THD i [%]
R	2,495	0,17	0,028	0,169	6,76
S	1,909	0,30	0,092	0,303	15,87
T	2,471	0,22	0,050	0,223	9,01

Tabel. Hasil perhitungan THDi Tertinggi pada hari Libur

FASA	JAM	Arus fundamental $[I_1]$	Arus Harmonisa $[I_h]$	$\sum I_h^2$	$\sqrt{\sum I_h^2}$	THD i [%]
R	1:00	2,449	0,21	0,044	0,210	8,57
S	9:00	1,905	0,48	0,230	0,480	25,20
T	4:00	2,207	0,30	0,090	0,300	13,59

Tabel. Hasil perhitungan THDi rata-rata pada hari Libur

FASA	Arus fundamental [I_1]	Arus Harmonisa [I_h]	$\sum I_h^2$	$\sqrt{\sum I_h^2}$	THD i [%]
R	2,449	0,15	0,023	0,150	6,12
S	1,905	0,35	0,120	0,346	18,16
T	2,207	0,24	0,059	0,242	10,98

2. Perhitungan Rugi-rugi akibat Harmonisa

Untuk menyederhanakan perhitungan, nilai arus harmonisa ke h yang digunakan merupakan nilai rata-rata pengukuran selama satu hari.

Tabel. Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-R

h	I_h (A)	I_h (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	2,6243	1	1	1	1
3	0,1687	0,0017	9	0,0000	0,0000
5	0,6230	0,0062	25	0,0000	0,0010
7	0,5857	0,0059	49	0,0000	0,0017
Jumlah				1,0001	1,0027

Tabel. Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-S

h	I_h (A)	I_h (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	0,8980	1	1	1	1
3	0,3030	0,0030	9	0,0000	0,0001
5	1,7226	0,0172	25	0,0003	0,0074
7	1,6530	0,0165	49	0,0003	0,0134
Jumlah				1,0006	1,0209

Tabel. Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-T

h	I_h (A)	I_h (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	2,6094	1	1	1	1
3	0,2226	0,0022	9	0,0000	0,0000
5	0,7735	0,0077	25	0,0001	0,0015
7	0,6074	0,0061	49	0,0000	0,0018
Jumlah				1,0001	1,0033

Tabel. Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-R

h	I_h (A)	$I h$ (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	2,5435	1	1	1	1
3	0,1500	0,0015	9	0,0000	0,0000
5	0,5473	0,0055	25	0,0000	0,0007
7	0,6241	0,0062	49	0,0000	0,0019
Jumlah				1,0001	1,0027

Tabel. Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-S

h	I_h (A)	$I h$ (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	0,8657	1	1	1	1
3	0,3459	0,0035	9	0,0000	0,0001
5	1,5209	0,0152	25	0,0002	0,0058
7	1,7477	0,0175	49	0,0003	0,0150
Jumlah				1,0005	1,0209

Tabel Hasil perhitungan arus harmonisa untuk fasa-T

h	I_h (A)	$I h$ (pu)	h^2	$I h^2$ (pu)	$I h^2 \times h^2$ (pu)
1	2,5277	1	1	1	1
3	0,2423	0,0024	9	0,0000	0,0001
5	0,6736	0,0067	25	0,0000	0,0011
7	0,6323	0,0063	49	0,0000	0,0020
Jumlah				1,0001	1,0031

Setelah menghitung arus harmonisa per unit per fasa, baik untuk hari kerja maupun hari libur selanjutnya dilakukan perhitungan rugi-rugi daya akibat harmonisa dalam satuan per unit.

Tabel. Hasil perhitungan rugi-rugi daya akibat harmonisa untuk hari kerja dalam satuan per unit

FASA	$\sum I_h^2$ [pu]	$\sum I_h \times h^2$ [pu]	P_{EC-R} [pu]	P_{LL} [pu]	Rugi - rugi I^2R [pu]	Rugi - rugi Arus Pusing [pu]
R	1,00008	1,00268	0,027	1,02749	1,0001	0,0274
S	1,00058	1,02089	0,027	1,02849	1,0006	0,0279
T	1,00010	1,00335	0,027	1,02753	1,0001	0,0274

Tabel. Hasil perhitungan rugi-rugi daya akibat harmonisa untuk hari Libur dalam satuan per unit

FASA	$\sum I_n^2$ [pu]	$\sum I_n \times h^2$ [pu]	P_{EC-R} [pu]	P_{LL} [pu]	Rugi - rugi I^2R [pu]	Rugi - rugi Arus Pusing [pu]
R	1,00007	1,00268	0,066	1,06576	1,0001	0,0657
S	1,00055	1,02086	0,066	1,06743	1,0005	0,0669
T	1,00009	1,00315	0,066	1,06581	1,0001	0,0657

Untuk merubah nilai rugi-rugi dalam satuan per unit menjadi dalam satuan watt sesuai dengan Standard, untuk rugi-rugi I^2R dikalikan dengan nilai 178,928 kW, dan untuk rugi-rugi arus pusing dikalikan dengan nilai 13,562 kW.

Tabel. Hasil perhitungan rugi-rugi daya akibat harmonisa tiap jam untuk hari kerja dalam satuan watt

FASA	Rugi - rugi I^2R [Kw]	Rugi - rugi Arus Pusing [Kw]	Rugi - rugi Total [Kw]
R	178,9416	0,3717	179,313
S	179,0316	0,3785	179,410
T	178,9462	0,3720	179,318
Total	536,9194	1,1222	538,0416

Tabel. Hasil perhitungan rugi-rugi daya akibat harmonisa tiap jam untuk hari libur dalam satuan watt

FASA	Rugi - rugi I^2R [Kw]	Rugi - rugi Arus Pusing [Kw]	Rugi - rugi Total [Kw]
R	178,9407	0,8909	179,832
S	179,0262	0,9070	179,933
T	178,9443	0,8913	179,836
Total	536,9112	2,6892	539,6005

2. Pembahasan

Dari hasil pengukuran gelombang arus memperlihatkan bahwa masing-masing fasa memiliki nilai arus yang berbeda. Hal ini dapat dinyatakan bahwa disamping arus beban mengandung harmonisa tetapi juga terjadi sistem pembebanan tidak seimbang.

Seberapa besar fluktuasi THDi akibat perubahan beban selama dua puluh empat jam, baik untuk hari kerja maupun hari libur memperlihatkan bahwa THDi tidak dapat dipolakan.

Dari hasil analisis harmonisa arus dapat dinyatakan bahwa hubungan antara THDi dan arus beban ataupun dengan daya beban tidak linier. Artinya setiap kenaikan THDi tidak selalu diikuti naiknya arus beban maupun daya beban. Diperkirakan naiknya arus beban tidak selalu diakibatkan oleh beban-beban non linier.

IV. KESIMPULAN

Pengukuran yang dilakukan selama dua puluh empat jam harmonisa arus, dan daya. Tingkat distorsi harmonisa arus untuk

masing-masing fasa selama pengukuran terjadi pada waktu yang berbeda:

- a. Untuk hari kerja fasa-R THDi tertinggi terjadi pada pukul 03:00 sebesar 10,02% dengan THDi rata-rata 6,76%, fasa-S THDi tertinggi terjadi pada pukul 09:00 sebesar 20,95% dengan THDi rata-rata 15,87%, dan fasa-T THDi tertinggi terjadi pada pukul 03:00 sebesar 10,93% dengan THDi rata-rata 9,01%. Sedangkan Untuk hari libur fasa-R THDi tertinggi terjadi pada pukul 01:00 sebesar 8,57% dengan THDi rata-rata 6,12%, fasa-S THDi tertinggi terjadi pada pukul 09:00 sebesar 25,20% dengan THDi rata-rata 18,16%, dan fasa-T THDi tertinggi terjadi pada pukul 04:00 sebesar 13,59% dengan THDi rata-rata 10,98%.
- b. Hasil analisis rugi-rugi finansial akibat adanya harmonisa arus yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9 diperoleh dari data masing-masing fasa sesuai dengan fluktuasi yang terjadi selama pengukuran yang kemudian dirata-ratakan, selanjutnya dilakukan rugi-rugi finansial. Hasil analisis menyatakan bahwa perkiraan rugi-rugi energi selama tahun 2013 adalah sebesar **4.715.676,52 kWh**.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rusli, M, *Analisis dan Evaluasi Dampak Harmonisa*, PT.PLN (PERSERO) Peyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera, 2010, Padang.
- [2] Arrillaga J, and Watson, N.R, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Dugan, Roger C, *Electrical power systems quality*, Second edition, McGraw-Hill, 2002.
- [4] Prof Jan Desmet, Hogeschool West-Vlaanderen, dkk. *Harmonics Selection And Rating Transformers*, Labo Lemcko : LPQI, November 2005.
- [4] SPLN, NO. 8, (1991) : Transformator Tenaga.
- [5] Rashid, M.H., *Elektronika Daya*, PT. Prenhallindo, 1999, Jakarta.