PENGARUH BENTUK GELOMBANG SINUS TERMODIFIKASI (*MODIFIED SINE WAVE*) TERHADAP UNJUK KERJA MOTOR INDUKSI SATU FASA

Robby Fierdaus[1], Ir. Soeprapto,MT.[2], Ir. Hery Purnomo,MT.[3]
[1]Mahasiswa Teknik Elektro, [2,3]Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail: robbyfierdaus@gmail.com

Abstrak--*Sistem photovoltaic* saat ini telah sampai pada sebuah sistem yang dapat diterapkan di perumahan yang biasa disebut dengan *Solar Home System* (SHS). *Sistem photovoltaic* ini akan mengubah energi yang dibangkitkan menjadi sumber energi listrik bolak-balik menggunakan alat berupa inverter. Pada skala SHS inverter yang digunakan adalah inverter jenis *Modified Sine Wave* yang mana bentuk gelombang keluaran adalah nonsinus. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh dari bentuk gelombang *Modified Sine Wave* pada beban non-linier rumah tangga yaitu motor induksi satu fasa (kipas angin). Dan penentuan parameter-parameter pada motor induksi satu fasa dilakukan dengan 3 pengujian, yaitu pengujian blok rotor, pengujian beban nol, dan pengujian sumber DC. Dengan persamaan-persamaan motor induksi satu fasa jenis *Permanent Split Capacitor* maka akan didapatkan besar efisiensi, torsi, serta rugi-rugi daya pada motor induksi saat beroperasi. Pendekatan juga dilakukan dengan menggunakan metode Deret Fourier. Dari hasil penilitian ini didapatkan besar efisiensi serta rugi-rugi daya saat menggunakan inverter modified sine wave adalah sebesar 20,17 % dan 36,72 W. Sedangkan bila menggunakan sumber sinusoida murni sebesar 21,78 % dan 35,19 W.

***Kata kunci -- Modified Sine Wave*, Motor Induksi Satu Fasa, Efisiensi, Rugi-rugi daya**

I. PENDAHULUAN

Pada *Solar Home System* (SHS) jarang sekali penggunaan inverter jenis *pure sine wave* dalam mengkonversikan arus listrik searah menjadi arus listrik bolak-balik. Hal ini disebabkan karena pembuatannya yang cukup rumit serta harga yang cukup mahal. Sehingga pada SHS banyak menggunakan inverter jenis *modified sine wave* dalam pengkonversian energi karena telah banyak tersedia dan lebih ekonomis.

Beban-beban rumah tangga ada dua jenis yaitu beban linier dan beban non-linier. Inverter jenis *modified sine wave* ini tidak akan mempengaruhi beban-beban linier seperti lampu. Akan tetapi inverter jenis ini akan banyak mempengaruhi beban-beban non-linier seperti pompa air, *air conditioning*, kipas angin, kulkas, dll. Dengan bentuk gelombang nonsinus pada inverter *modified sine wave* akan mempengaruhi unjuk kerja dari motor-motor pada beban-beban non-linier tersebut. Mulai dari rugi-rugi daya, torsi, sampai efisiensi dari motor-motor tersebut.

Bentuk gelombang *modified sine wave* ini memiliki harmonisa yang besar. [1] Sehingga pengaruh harmonisa ini akan berakibat pada kinerja dari motor induksi satu fasa. Besar pengaruh bentuk gelombang *modified sine wave* terhadap salah satu beban nonlinier rumah tangga yaitu motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* pada kipas angin, akan diteliti lebih lanjut dalam penilitian ini. Dengan batasan masalah sebagai berikut :

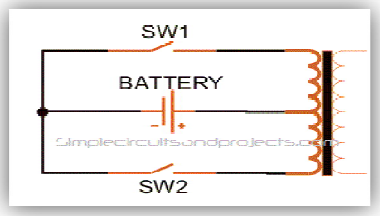
1. Pemodelan inverter penghasil gelombang *modified sine wave* menggunakan inverter PWM berbasis pemrograman yang sederhana.
2. Motor yang digunakan adalah motor induksi satu fasa jenis *Permanently Split Capacitor* (PSC) pada kipas angin dengan daya 55 Watt.
3. Analisis dilakukan pada saat motor induksi dalam keadaan *steady state*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

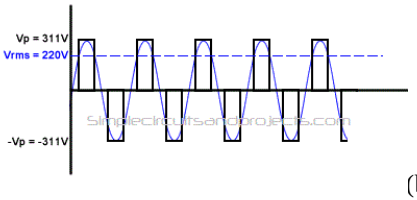
A. Inverter

Konversi daya dari DC ke AC disebut dengan inverter. Fungsi dari inverter adalah untuk merubah tegangan masukan DC menjadi tegangan AC. Frekuensi ataupun besar tegangan keluaran dari inverter bisa tetap atau berubah-ubah. Variabel tegangan keluaran bisa ditentukan dengan mengubah-ubah masukan dc (terkontrol).

Salah satu inverter sederhana yang dapat menghasilkan gelombang *modified sine wave* adalah inverter tap tengah yang mana gambar rangkaian ekivalen dapat dilihat pada **Gambar 1.a** dan bentuk gelombang *modified sine wave* dapat dilihat pada **Gambar 1.b**.



(a)



(b)

Gambar 1. a. Rangkaian inverter tap tengah
b. Gelombang *Modified Sine Wave* [2]

B. Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi adalah motor listrik bolak-balik (AC) yang putaran rotornya tidak sama dengan putaran medan stator, dengan kata lain putaran rotor dengan putaran medan stator terdapat selisih putaran yang disebut slip.

1. Parameter Motor Induksi Satu Fasa

Parameter-parameter pada motor induksi satu fasa meliputi R_{1m}, R_{1a}, R_2, X_1, X_2', X_m, X_c. Parameter-parameter ini didapatkan melalui 3 pengujian yaitu pengujian DC, pengujian blok rotor, dan pengujian tanpa beban. Pada pengujian DC didapatkan parameter R_{1m} dan R_{1a} melalui persamaan 1 dan 2. [3]

$$R_{1m} = 1{,}3\frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (1)$$

$$R_{1a} = 1{,}3\frac{R_{1m}\frac{V_{DC}}{I_{DC}}}{R_{1m}-\frac{V_{DC}}{I_{DC}}} \quad (2)$$

keterangan:

V_{DC} = Tegangan sumber DC
I_{DC} = Arus yang terukur

Dan pada pengujian blok rotor akan didapatkan parameter X_1, X_2', dan R_2', dengan hasil pengukuran V_{BR} (Tegangan Blok Rotor), I_{BR} (Arus Blok Rotor), dan P_{BR} (Daya Blok Rotor) melalui persamaan dibawah ini. [3]

$$X_1 = 0{,}4\sqrt{{Z_{eq}}^2 - {R_{eq}}^2} \quad (3)$$

$$X_2' = 0{,}6\sqrt{{Z_{eq}}^2 - {R_{eq}}^2} \quad (4)$$

$$R_2' = R_{eq} - R_{1m} \quad (5)$$

keterangan :

$Z_{eq} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}}$
$R_{eq} = \frac{P_{BR}}{{I_{BR}}^2}$

Dari pengukuran tanpa beban didapatkan nilai V_{NL} (Tegangan Tanpa Beban), I_{NL} (Arus Tanpa Beban) dan P_{NL} (Daya Tanpa Beban) sehingga didapatkan parameter X_m melalui persamaan berikut : [3]

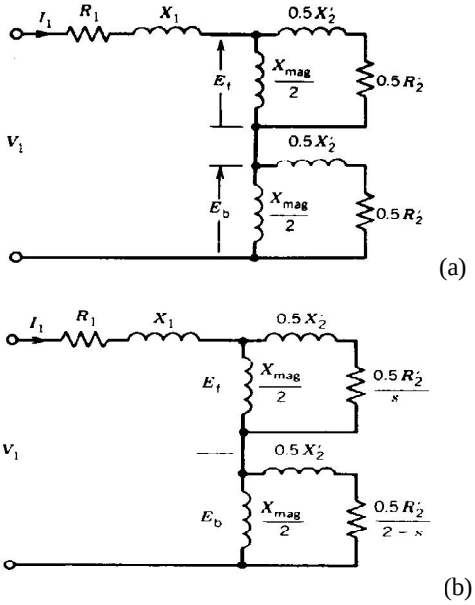
$$X_m = 2X_{NL} - 2X_1 - {X'}_2 \quad (6)$$

keterangan :

$X_{NL} = \sqrt{{Z_{NL}}^2 - {R_{NL}}^2}$
$ZNL = \frac{V_{NL}}{I_{NL}}$
$RNL = \frac{P_{NL}}{{I_{NL}}^2}$

2. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Satu Fasa

Dengan mengacu pada prinsip kerja motor induksi satu fasa menggunakan teori medan putar ganda. Maka komponen-komponen pada rangkaian ekivalen dibedakan menjadi komponen-komponen pada medan aruh maju (f) dan komponen-komponen pada medan arah mundur (b) seperti yang terlihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. a. Motor dalam keadaan diam **b.** Motor dalam keadaan berputar [4]

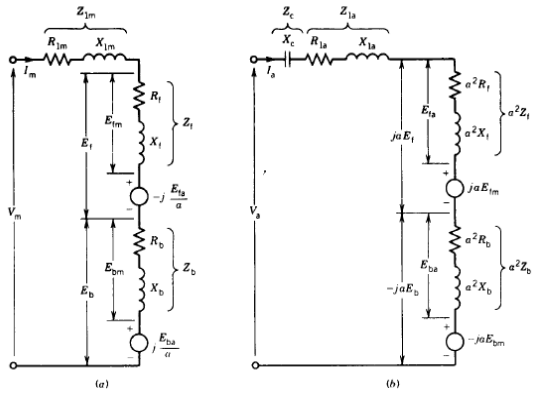
Dari rangkaian diatas didapatkan persamaan ekivalen : [4]

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{R'_2}{s}+jX'_2\right)0{,}5jX_m}{\left(\frac{R'_2}{s}+jX'_2\right)+jX_m}\ \Omega \quad (7)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\left(\frac{R'_2}{(2-s)}+jX'_2\right)0{,}5jX_m}{\left(\frac{R'_2}{(2-s)}+jX'_2\right)+jX_m}\ \Omega \quad (8)$$

3. Persamaan Motor Induksi Satu fasa

Untuk motor induksi jenis *permanent split capacitor* terdapat sedikit perbedaan pada rangkaian ekivalen karena kumparan bantu tidak hanya digunakan pada saat start tetapi digunakan juga saat berputar. Jadi rangkaian ekivalen motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Rangkaian Ekivalen *Permanent Split Capacitor* [4]

keterangan :

V_m = Tegangan masukan motor pada kumparan utama

V_a = Tegangan masukan motor pada kumparan bantu

R_{1m} = Resistansi pada kumparan utama stator

X_{1m} = Reaktansi pada kumparan utama stator

R_{1a} = Resistansi pada kumparan bantu stator

X_{1a} = Reaktansi pada kumparan bantu stator

X_c = Reaktansi kapasitor permanen

Dari rangkaian ekivalen tersebut dapat dibuat persamaan dari tegangan-tegangan tiap kumparan. Dengan menurunkan beberapa persamaan tegangan tersebut maka didapatkan persamaan untuk mendapatkan arus pada tiap kumparan sebagai berikut : [3]

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{V}_1(Z_{22}-Z_{12})}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}} \quad (9)$$

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_1(Z_{11}-Z_{21})}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}} \quad (10)$$

keterangan :

$$Z_{11} = R_{1m} + Z_f + Z_b + jX_1$$

$$Z_{12} = -ja(Z_f - Z_b)$$

$$Z_{21} = ja(Z_f - Z_b)$$

$$Z_{22} = Z_a + a^2(Z_f + Z_b + jX_1)$$

I_m = Arus pada kumparan utama

I_a = Arus pada kumparan bantu

Dan rugi-rugi tembaga yang terjadi baik pada sisi stator maupun rotor adalah akibat dari komponen resistansi pada kumparan. Persamaan untuk rugi-rugi tembaga (*Copper Losses*) adalah : [3]

$$P_{CL} = P_{SCL} + P_{RCL}$$

$$= {I_m}^2.R_{1m} + {I_a}^2.R_{1a} + s.P_{AG,f} + (2-s).P_{AG,b} \quad (11)$$

Selain itu rugi-rugi juga terjadi pada inti dan juga rugi mekanik. Rugi daya ini dapat didefinisikan melalui persamaan berikut : [4]

$$P_{rot} = P_{NL} - {I_{NL}}^2\left(R_1 + \frac{R'_2}{4}\right) \quad (12)$$

Efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan yang didefiniskan melalui persamaan 2-7. [3]

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} x100\% \quad (13)$$

Torsi yang terinduksi dalam motor induksi tiga fasa dapat diterapkan pada motor induksi satu fasa, yaitu : [3]

$$T = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \quad (14)$$

C. Metode Deret Fourier

Gelombang periodik yang tidak berbentuk sinusoida murni seperti halnya *modified sine wave* dapat dinyatakan dalam jumlah seri harmonisa frekuensi dasar yang dinyatakan dengan analisis persamaan Fourier sebagai berikut : [5]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos \omega nt + b_n \sin \omega nt) \quad (15)$$

keterangan :

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)d(t)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(n\omega t)\,d(t)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(n\omega t)\,d(t)$$

Dan besar nilai RMS dari gelombang non-sinus seperti *modified sine wave* dapat didefinisikan oleh persamaan 2-13. [5]

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}{F_n}^2}$$

$$= \sqrt{{F_1}^2 + {F_n}^2} \quad (16)$$

keterangan :

F_{RMS} = tegangan atau arus saat terdistorsi

T = periode (detik)

F_1 = tegangan atau arus fundamental

F_n = tegangan atau arus harmonik

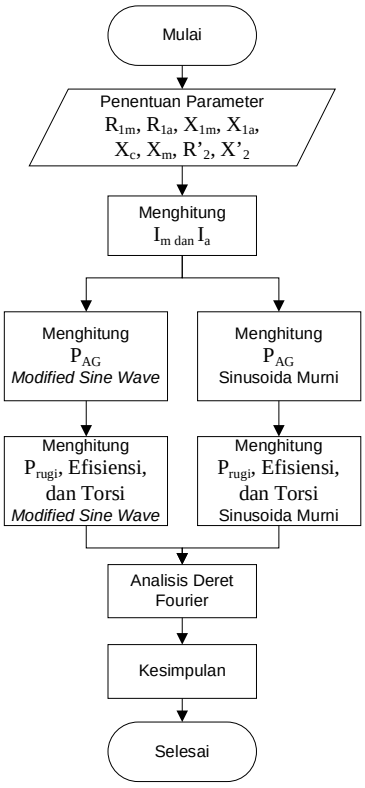
III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan meliputi studi literatur terhadap pemodelan inverter *modified sine wave* dan motor induksi satu fasa jenis *permannet split capacitor*. Pengambilan data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian ini meliputi data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, internet, dan data primer yang didapat dari spesifikasi komponen penelitian. Adapun perhitungan dan analisis yang dilakukan dalam penilitian ini meliputi :

1. Penentuan parameter-parameter motor induksi R_{1m}, R_{1a}, X_{1m}, X_{1a}, X_c, X_m, R'_2, X'_2.

2. Perhitungan arus pada kumparan bantu dan kumparan utama.
3. Perhitungan besar daya celah udara pada motor induksi satu fasa saat menggunakan sumber sinusoida murni dan *modified sine wave.*
4. Perhitungan rugi-rugi daya, efisiensi, dan torsi pada motor induksi satu fasa saat menggunakan sumber sinusoida murni dan *modified sine wave.*
5. Menganalisis besar pengaruh bentuk gelombang *modified sine wave* terhadap kinerja motor induksi satu fasa melalui besar harmonisa gleombang *modified sine wave*.

Langkah-langkah dalam melakukan perhitungan dan analisis pada penelitian ini dapat digambarkan pada diagram alir berikut ini.



Gambar 4. Diagram Alir Perhitungan dan Analisis

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Parameter Motor Induksi Satu Fasa

Dalam penentuan parametet motor induksi satu fasa dilakukan 3 pengujian, yaitu pengujian Sumber DC, pengujian blok rotor, pengujian beban nol. Hasil dari ketiga pengujian dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Pengujian Parameter Motor Induksi 1 Fasa

Sumber DC		Blok Rotor		Tanpa Beban	
V_{DC1}	11,5 V	P_{BR}	46,4 W	P_{NL}	38,5 W
I_{DC1}	0,03 A	I_{BR}	0,26 A	I_{NL}	0,23 A
V_{DC2}	11,5 V	V_{BR}	182 V	V_{NL}	220 V
I_{DC2}	0,05 A				

Dari hasil pengujian tersebut maka akan didapatkan parameter-parameter motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* seperti yang terlihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter-Parameter Motor Induksi 1 Fasa

Parameter	Nilai (Ω)
R_{1m}	498,33
R_{1a}	747,5
R_2'	188,057
X_1	54,944
X_2'	82,416
X_m	1049,078
X_c	2123,142

B. Analisis Rugi-rugi Daya

Rugi-rugi daya pada motor induksi meliputi rugi-rugi tembaga dan rugi *rotational* (rugi mekanik dan rugi inti). Rugi *rotational* diasumsikan konstan, karena pada dasarnya motor induksi bekerja pada frekuensi dan tegangan yang sama pada saat berbeban maupun tanpa beban. Dengan menggunakan persamaan 11 dan 12 maka akan didapatkan besar rugi-rugi daya motor induksi satu fasa saat diberi sumber *modified sine wave* sebesar 36,72 W dan saat diberi sumber sinusoida murni sebesar 35,19 W.

Pada sumber inverter *modified sine wave* mengalir arus yang lebih besar dari pada sumber sinusoida murni sehingga mengakibatkan rugi-rugi daya yang lebih besar. Akibat rugi-rugi daya yang besar ini, maka energi yang dikonsumsi dari suatu peralatan akan semakin besar dan energi yang hilang (berupa panas) juga lebih besar.

C. Analisis Efisiensi

Pada motor, efisiensi bisa dinyatakan sebagai seberapa banyak energi yang hilang akibat rugi-rugi pada motor tersebut. Semakin besar efisiensi maka semakin kecil energi yang hilang akibat rugi-rugi motor. Pada motor induksi satu fasa yang diberi sumber inverter *modified sine wave* memilki efisiensi sebesar :

$$\eta = \frac{46 - 36{,}72}{46} x100\%$$

$$\eta = 20{,}17\ \%$$

Dan untuk sumber sinusoida murni :

$$\eta = \frac{45 - 35{,}19}{45} x100\%$$

$$\eta = 21{,}78\ \%$$

Dari sini dapat dilihat bahwa motor induksi satu fasa yang diberi sumber inverter *modified sine wave* memilki efisiensi yang lebih kecil, hal ini disebabkan karena rugi-rugi pada motor induksi satu fasa saat menggunakan sumber *modified sine wave* lebih besar dari pada sumber sinusoida murni. Dengan daya masukkan yang lebih besar serta efisiensi yang lebih kecil menyatakan bahwa dengan menggunakan sumber

modified sine wave mengakibatkan lebih banyak energi yang hilang berupa panas yang dapat meningkatkan temperatur dari motor induksi.

D. Analisis Torsi

Dari hasil pengujian dan perhitungan menggunakan persamaan 14 didapatkan besar torsi saat berbeban dan tanpa seperti yang terlihat pada **Tabel 3.**

Tabel 3. Hasil Perhitungan Torsi

	Modified Sine Wave	**Sinusoida murni**
Berbeban	56,53 . 10^{-3} Nm	57,67 . 10^{-3} Nm
Tanpa Beban	58,63 . 10^{-3} Nm	16,01 . 10^{-3} Nm

Torsi yang dihasilkan oleh sumber *modified sine wave* pada saat berbeban, lebih kecil daripada sumber sinusoida murni. Kondisi ini diakibatkan oleh putaran rotor yang lebih kecil pada sumber *modified sine wave*, sehingga mengakibatkan slip yang lebih besar dan menghasilkan torsi yang kecil menurut persamaan torsi pada motor induksi satu fasa.

Selain itu besar torsi pada saat berbeban ketika menggunakan sumber sinusoida murni lebih besar dari pada saat menggunakan sumber *modified sine wave*, sedangkan arus yang dibutuhkan dari hasil perhitungan lebih besar daripada menggunakan sumber sinusoida murni. Sehingga dengan konsumsi arus yang lebih besar dan menghasilkan torsi yang lebih kecil maka sumber inverter *modified sine wave* ini tidak efektif digunakan sebagai sumber tegangan pada motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* yang digunakan pada kipas angin.

E. Analisis Deret Fourier

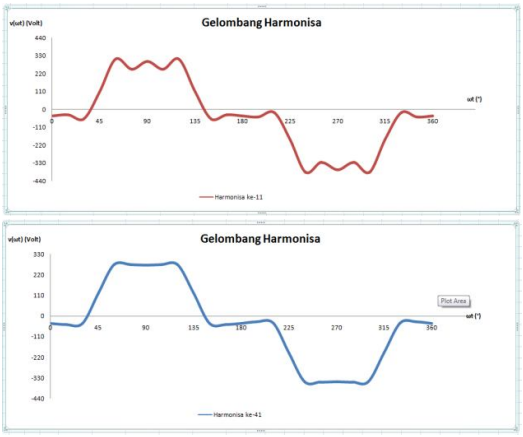
Modified sine wave merupakan bentuk gelombang dengan harmonisa yang besar. Dengan menggunakan metode Deret Fourier akan didapatkan besar harmonisa dari gelombang *modified sine wave*. Mengacu pada **Gambar 1.b** didapatkan persamaan gelombang *modified sine wave* sebagai berikut :

$$v(\omega t) = \begin{cases} A & T/8 < t < T3/8 \\ -A & T5/8 < t < T7/8 \\ 0 & t \text{ yang lain} \end{cases}$$

Dengan menggunakan persamaan 15 didapatkan persamaan arus gelombang *modified sine wave* dalam Deret Fourier sebagai berikut :

$$i(\omega t) = -\frac{3}{80} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{n10\pi}\left(\cos(n\pi\,{}^{1}/_{4}) - \cos(n\pi\,{}^{3}/_{4}) - \cos(n\pi\,{}^{5}/_{4}) + \cos(n\pi\,{}^{7}/_{4})\right) \sin(n\omega t)$$

Dari persamaan deret fourier didapatkan bentuk gelombang harmonisa *modified sine wave* yang terlihat pada **Gambar 5.**



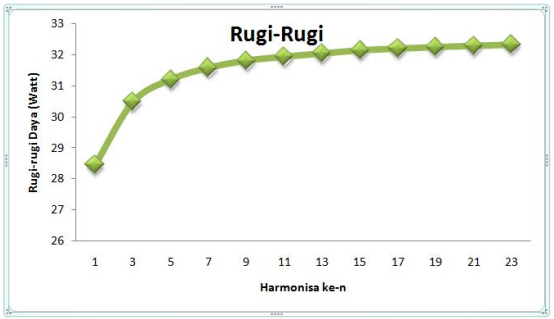
Gambar 5. Gelombang Harmonisa ke-11 dan ke 41 dari *Modified Sine Wave*

Dengan menentukan besar arus RMS menggunakan persamaan 16. Maka akan didapatkan besar rugi-rugi daya motor induksi satu fasa. perhitungan arus RMS dan rugi-rugi daya hingga harmonisa ke-23 terlihat pada **Tabel 4.**

Tabel 4. Hasil Perhitungan Arus RMS

Harmonisa ke-n	**I_{rms} (A)**	**Rugi-Rugi (Watt)**
1	0,1946	28,4501
3	0,2048	30,4758
5	0,2083	31,1992
7	0,2101	31,5783
9	0,2112	31,8073
11	0,2119	31,935
13	0,2124	32,0375
15	0,2128	32,1402
17	0,2131	32,1916
19	0,2133	32,2431
21	0,2135	32,2817
23	0,2137	32,3204

Dari besarnya rugi-rugi daya yang didapatkan dari hasil perhitungan pada **Tabel 4**, didapatkan grafik rugi-rugi daya – harmonisa ke-n pada **Gambar 6.**



Gambar 6. Grafik Hubungan Rugi-Rugi Daya Terhadap Harmonisa ke-n

Harmonisa ke-1 merupakan harmonisa untuk gelombang fundamental yaitu gelombang sinusoida. Sehingga besar rugi-rugi dari harmonisa ke-1 kurang

lebih sama dengan besar rugi-rugi saat diberi sumber sinusoida dengan asumsi putaran rotor sama dengan putaran rotor *modified sine wave*. Dari **Gambar 6** grafik hubungan rugi-rugi daya terhadap harmonisa mengalami kenaikan yang cukup besar mulai dari harmonisa ke-1 sampai harmonisa ke-7 dikarenakan mengalami perubahan bentuk gelombang dari gelombang sinusoida menjadi gelombang nonsinusoida. Tetapi harmonisa ke-11 dan seterusnya mengalami kenaikan rugi-rugi daya yang kecil karena bentuk dari gelombang harmonisa ke-11 dan seterusnya telah menyerupai bentuk gelombang *modified sine wave*.

Pada **Gambar 5** terlihat bahwa gelombang *modified sine wave* memiliki harmonisa yang besar yaitu lebih dari 41 harmonisa. Dan dari grafik pada **Gambar 6** menyatakan bahwa semakin besar harmonisa akan mengakibatkan semakin besarnya rugi-rugi. Dan dengan putaran yang sama, sumber sinusoida memiliki rugi-rugi daya yang jauh lebih kecil dari sumber *modified sine wave*.

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa sumber inverer *modifiied sine wave* tidak baik digunakan pada beban motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* dalam *solar home system*, yang disebabkan oleh :

1. Perubahan rugi-rugi daya pada motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* pada kipas angin, mengalami kenaikan saat diberi sumber inverter *modified sine wave* dengan besar rugi-rugi daya sebesar 36,72 Watt. Dibandingkan sumber sinusoida murni dengan besar rugi-rugi daya sebesar 35,19 Watt.
2. Pengaruh bentuk gelombang *modified sine wave* terhadap torsi pada motor induksi satu fasa, mengakibatkan menurunnya torsi motor saat berbeban yaitu sebesar $56{,}53.10^{-3}$ Nm dibandingkan dengan torsi saat diberi sumber sinusoida murni yaitu sebesar $57{,}67.\ 10^{-3}$ Nm.
3. Penggunaan sumber inverter *modified sine wave* menyebabkan menurunnya efisiensi dari motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* pada kipas angin. Penurunan efisiensi motor induksi dari 21,78 % menjadi 20,17%.

References

[1] Doucet, Jim., Dan, E. & Jeremy, S. 2006. *DC/AC Pure Sine Wave Inverter*. USA: WPI. http://blogpdf.com/dc%252Fac-pure-sine-wave-inverter-1996126.
(diakses 19 September 2012)

[2] .....,2010, http://www.simplecircuitsandprojects.com,.....,.....

[3] Wahyudinata. 2010. *Analisis Performansi Motor Induksi Kapasitor Permanen Satu Phasa Dengan Belitan Bantu Dan Belitan Utama Berdasarkan Teori Medan Fluksi Silang Dan Teori Medan Fluksi Ganda*. Skripsi dipublikasikan. Medan: Universitas Sumatera Utara.

[4] Sen, P. C. 1996. *Principles of Electrical Machines and Power Electronics Second Edition.*Canada: John Wiley & Sons, Inc.

[5] Arrillaga, Jos & Neville R. Watson. 2003. *Power System Harmonics Second Edition.* England : John Wiley & Sons, Ltd.