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

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

ROBBY FIERDAUS

NIM. 0810630090-63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2013

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PERSETUJUAN

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

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

ROBBY FIERDAUS
NIM. 0810630090-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Ir. Soeprapto, M.T	**Ir. Hery Purnomo, M.T**
NIP. 19561020 198903 1 001	**NIP. 19550708 198212 1 001**

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

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

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ROBBY FIERDAUS

NIM. 0810630090 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 30 Januari 2013

Majelis Penguji:

Ir. Hari Santoso, M.S	**Ir. Unggul Wibawa, M.Sc**
NIP. 19531205 198503 1 001	**NIP. 19630106 198802 1 001**

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIP. 19580609 198703 1 003

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS.

NIP. 19580728 198701 1 001

KATA PENGANTAR

اَلسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللهِ وَبَرَكَاتُهُ

Alhamdulillahi Robbil 'Aalamiin, segala puji bagi Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi dengan judul "*Pengaruh Bentuk Gelombang Sinus Termodifikasi (Modified Sine Wave) Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi Satu Fasa Pada Sistem Photovoltaic*" dapat diselesaikan dengan baik.

Satu tahun bukan waktu yang singkat dalam menyelesaikan tugas ini,. Selama waktu tersebut begitu banyak hal-hal yang terjadi, dimulai dari masa-masa awal, masa dimana waktu pembelajaran dan semangat-semangatnya, dilanjutkan dengan masa-masa sulit, masa dimana penulis menemui kegagalan-kegagalan dalam pembuatan alat, namun beruntung orang-orang terdekat selalu memberi semangat, dorongan dan saran-saran yang sampai akhirnya menuju masa-masa akhir dimana penulis seperti diberi jalan keluar sehingga pada akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu hingga dapat diselesaikannya skripsi ini, khususnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan Bapak M. Azis Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Moch. Rif'an ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan Bu Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc., Ph.D. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. Soeprapto, MT dan Bapak Ir. Hery Purnomo, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak masukan, inspirasi, dan koreksi dalam skripsi ini.
4. Bapak Ir. Hari Santoso, Ms. selaku kepala Lab. Elektronika Daya.
5. Seluruh dosen dan karyawan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
6. Ibunda Prof. Dr. Ir. Sri Andayani atas segala doa dan dukungan yang diberikan, juga kepada saudara penulis Nuris, Sela serta Feby.

7. Nuha Nadhiroh yang dengan setia menemani, memberikan semangat dan bantuan selama proses pengerjaan skripsi berlangsung.
8. Rekan - rekan Asisten Lab. Elektronika Daya, Paket A, Concordes, senior dan junior Elektro Universitas Brawijaya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Tak ada gading yang tak retak, tersadar bahwa skripsi ini sangat jauh dari kesempurnaan, maka kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

وَالسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللهِ وَبَرَكَاتُهُ

Malang, 18 Januari 2013

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **vii**
DAFTAR TABEL ..... **ix**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **x**
RINGKASAN ..... **xi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan 3
1.5 Sistematika Penulisan 3
BAB II DASAR TEORI **4**
2.1 Inverter 4
2.2 Harmonisa 7
2.2.1 Analisa Harmonisa dengan Metode Fourier 8
2.2.2 Orde Harmonik 9
2.2.3 Nilai RMS 10
2.3 Motor Induksi Satu Fasa 10
2.3.1 Konstruksi Motor Induksi Satu Fasa 11
2.3.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Satu Fasa 12
2.3.3 Jenis Motor Induksi Satu Fasa 16
2.3.4 Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa 18
2.3.5 Penentuan Parameter Motor Induksi Satu Fasa 23
2.3.6 Daya Dan Torsi Pada Motor Induksi Satu Fasa 27
BAB III METODE PENELITIAN **30**
3.1. Studi Literatur 30
3.2. Spesifikasi Alat 30
3.3. Cara Melakukan Penelitian 30
3.4. Menganalisis Data 32

3.5. Pengambilan Kesimpulan dan Saran 33
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS 34
4.1 Penentuan Parameter Pada Motor Induksi Satu Fasa 34
4.2 Analisis Rugi-rugi Pada Motor Induksi Satu Fasa 38
4.2.1. Analisis Daya Celah Udara (*Air-Gap Power*) 38
4.2.2. Analisis Rugi Tembaga (*Copper Losses*) 44
4.3 Analisis Efisiensi Pada Motor Induksi Satu Fasa 45
4.4 Analisis Torsi Pada Motor Induksi Satu Fasa 47
4.5 Analisis Harmonisa Bentuk *Modified Sine Wave* 48
BAB V PENUTUP 56
5.1 Kesimpulan 56
5.2 Saran 56
DAFTAR PUSTAKA 58
LAMPIRAN 59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 a. Pure Sine Wave ; b. Square Wave ; c. Modified Sine Wave 5
Gambar 2.2 Rangkaian Sederhana Inverter Tap Tengah..... 6
Gambar 2.3 Prinsip Kerja Inverter Tap Tengah..... 6
Gambar 2.4 Bentuk Gelombang Keluaran Inverter 7
Gambar 2.5 Bentuk Gelombang Dasar, Harmonisa, dan Gelombang Terdistorsi..... 8
Gambar 2.6 Konstruksi Umum Motor Induksi Satu Fasa 11
Gambar 2.7 Medan Magnet Stator 12
Gambar 2.8. Motor Dalam Keadaan Berputar 13
Gambar 2.9 Fluksi Rotor Tertinggal 90^o Terhadap Fluks Stator 14
Gambar 2.10 Resultan Medan Magnet Stator dengan Rotor..... 14
Gambar 2.11 Konsep Medan Putar Ganda 15
Gambar 2.12 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa 16
Gambar 2.13. *Permanent Capacitor Motor* (a) Rangkaian (b) Karakteristik Torsi-Kecepatan 17
Gambar 2.14. Motor Induksi Satu Fasa dalam Keadaan Diam 19
Gambar 2.15. Motor Induksi Satu Fasa dalam Keadaan Berputar..... 20
Gambar 2.16 Rangkaian Ekivalen Motor *Permanent Split Capacitor Capacitor* Motor Induksi Satu Fasa (a) Kumparan Utama (b) Kumparan Bantu 21
Gambar 2.17 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Satu Fasa Saat Blok Rotor..... 24
Gambar 2.18 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Satu Fasa Saat Tanpa Beban..... 26
Gambar 2.19 Diagram Aliran Daya Pada Motor Induksi Satu Fasa 27
Gambar 3.1 Diagram Blok Rangkaian 30
Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan dan Analisis 32
Gambar 4.1 Rangkaian Pengujian Sumber DC (a) Pengujian Tahanan Utama (b) Pengujian Tahanan Bantu..... 34
Gambar 4.2 Rangkaian Pengujian Rotor Ditahan..... 35
Gambar 4.3 Rangkaian Pengujian Tanpa Beban 36
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Sinus Termodifikasi 48
Gambar 4.5 Gelombang Harmonisa ke-n dari *Modified Sine Wave* 50
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Rugi-Rugi Daya Terhadap Harmonisa ke-n 53

Gambar 4.7 Tampilan Osiloskop *Modified Sinewave* 54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Distribusi Empiris dari X_{BR} 25
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Motor Induksi Satu Fasa 39
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Putaran dan Arus Masukkan 47
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Torsi 47
Tabel 4.4 Nilai I_{rms} dari Harmonisa ke-n 52
Tabel 4.5 Rugi-rugi dari Harmonisa ke-n 52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengujian Parameter Motor Induksi Satu Fasa 60
Lampiran 2. Foto Alat 63
Lampiran 3. Karakteristik Motor Induksi Satu fasa 65
Lampiran 4. Tabel Perhitungan Harmonisa ke-41 67

RINGKASAN

Robby Fierdaus (0810630090), Jurusan Teknik Elektro, Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Januari 2013,***Pengaruh Bentuk Gelombang Sinus Termodifikasi (Modified Sine* Wave) Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi Satu Fasa**.Dosen Pembimbing: Ir. Soeprapto, MT. dan Ir. Hery Purnomo, MT.

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.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh dari bentuk gelombang *Modified Sine Wave* pada beban 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

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan pembangkit energi listrik telah sampai pada sebuah sistem yang dapat dikelola sendiri yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS atau biasa disebut sistem *photovoltaic* memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi yang akan dikonversikan menjadi energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan oleh sistem *photovoltaic* akan melalui beberapa tahapan hingga dapat digunakan sebagai sumber energi untuk beban rumah tangga. Salah satunya melalui tahapan konversi energi, yaitu melalui inverter. Inverter akan menghasilkan tegangan dan arus bolak balik melalui proses *Pulse Width Modulation* (PWM) dari arus listrik searah. Konverter ini dibutuhkan karena sistem photovoltaic menghasilkan arus listrik searah sedangkan pada beban rumah tangga kebanyakan membutuhkan arus listrik bolak balik.

Inverter memiliki bermacam-macam jenis menurut bentuk gelombang keluarannya, yaitu inverter *pure sine* wave, inverter *square* wave, dan inverter *modified sine wave*. Inverter *pure sine wave* ini sangat baik dalam mengkonversi energi sehingga tidak memiliki harmonisa pada tegangan maupun arus keluarannya seperti halnya pada sumber PLN. Tetapi inverter *pure sine wave* ini jarang sekali digunakan pada sistem *photovoltaic* yang setingkat perumahan (*Solar Home System*) karena harganya yang mahal dan juga ketersedian barangnya pun cukup langka. Sehingga pada sistem *photovoltaic* konvensional lebih banyak menggunakan inverter *modified sine wave* dalam komponen inverter-nya. Karena inverter *modified sine wave* lebih mudah dalam pembuatan serta cukup murah, tetapi gelombang keluaran inverter ini memiliki harmonisa yang besar. (Doucet, 2006)

Pada inverter *modified sine wave* ini tidak akan bermasalah apabila digunakan pada beban linier seperti lampu, karena pengaruh harmonisa yang dihasilkan oleh inverter tidak akan banyak mempengaruhi kinerja dari beban linier tersebut. Akan tetapi harmonisa dari bentuk gelombang *modified sine wave*, akan berpengaruh pada

beban-beban rumah, seperti motor listrik yang digunakan pada pompa air, kipas angin, blender dll. Sehingga bentuk gelombang dari inverter *modified sine wave* ini akan mempengaruhi kinerja motor induksi yang berada pada beban-beban rumah tangga.

Besarnya pengaruh dari gelombang sinus termodifikasi ini terhadap unjuk kerja motor induksi dalam sistem *photovoltaic* akan di evaluasi dalam penelitian ini melalui perancangan inverter sederhana dengan beban motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor*. Dan diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan untuk menentukan jenis inverter maupun penggunaan jenis-jenis beban pada *solar home system*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang di atas maka pembahasan dalam skripsi ini ditekankan pada:

1. Bagaimana perubahan rugi-rugi daya pada motor induksi satu fasa akibat bentuk gelombang *modified sine wave*.
2. Bagaimana perubahan torsi pada motor induksi satu fasa akibat bentuk gelombang *modified sine wave*.
3. Bagaimana perubahan efisiensi pada motor induksi satu fasa akibat gelombang *modified sine wave*.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan penekanan pembahasan di atas maka ruang lingkup pada skripsi ini adalah:

1. Pemodelan inverter pembentukan *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*.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk dapat mengevaluasi pengaruh dari gelombang sinus termodifikasi (*modified sine wave*) terhadap unjuk kerja motor induksi satu fasa pada *solar home system.*

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari skripsi ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi tentang uraian latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan serta sistematika penulisan.

BAB II : DASAR TEORI

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan meliputi teori inverter, teori mesin elektrik, serta teori harmonisa

BAB III : METODE PENELITIAN

Berisi metode penelitian yang akan dilakukan, meliputi metode yang digunakan, obyek penelitian dan data yang diperlukan serta langkah penelitian.

BAB IV : PENGUJIAN dan ANALISIS

Berisi penjelasan tentang cara pengujian dan hasil pengujian, analisis terhadap masalah yang diajukan dalam skripsi dengan memperhatikan hasil pengujian dan data yang diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN dan SARAN

Berisi kesimpulan dari tujuan skripsi yang akan dibuat serta saran dari penulis.

BAB II

DASAR TEORI

Dalam sistem *photovoltaic* terdapat beban motor induksi satu fasa yang sering digunakan sebagai beban dari panel surya. Sedangkan inverter yang digunakan kebanyakan inverter *modified sine wave* yang menghasilkan gelombang keluaran yang tidak sinusoda murni. Tinjauan pustaka yang dapat mendukung analisis terhadap beban motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* meliputi inverter, *modified sine wave*, harmonisa, serta motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor*.

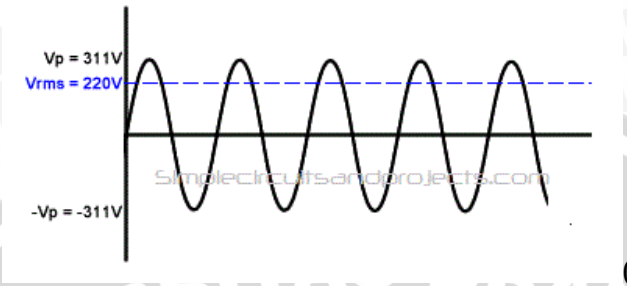
2.1 Inverter

Alat untuk mengkonversi daya dari arus listrik searah menjadi arus listrik bolak balik disebut dengan inverter. Tegangan masukan inverter dapat berasal dari baterai, *fuel cell, solar cell,* atau sumber DC lainnya. Frekuensi ataupun besar tegangan keluaran dari inverter bisa tetap atau berubah-ubah. Variabel tegangan keluaran bisa ditentukan dengan mengubah-ubah masukan DC (terkontrol). Macam-macam tegangan masukan inverter biasanya 120 Volt untuk frekuensi 60 Hz, 220 Volt untuk frekuensi 50 Hz, dan sebagainya.

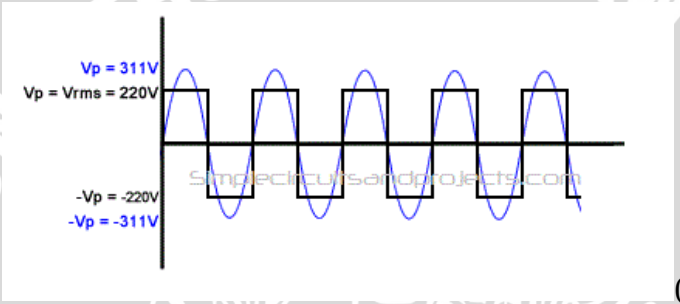
Bentuk gelonbang tegangan keluaran dari inverter ideal adalah sinusoida Namun dalam prakteknya gelombang keluaran inverter tidak sinusoida dan mengandung harmonisa. Untuk penggunaan yang berdaya rendah sampai menengah bentuk tegangan gelombang kotak masih dapat diterima sedangkan untuk aplikasi berdaya tinggi, distorsi gelombang tegangan yang rendah sangat diperlukan.

Pada awal penemuan teknologi inverter, bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan adalah *square wave*. Bentuk *square wave* atau gelombang kotak ini dapat merusak peralatan listrik sehingga para pakar elektronika mengembangkan kembali teknologi inverter agar aman untuk peralatan listrik yaitu dari bentuk *square wave* menjadi *modified sine wave* yang kemudian dengan meningkatkan level tegangan menjadi *pure sine wave*. Sehingga bentuk gelombang keluaran dari inverter diklasifikasikan menjadi tiga bentuk, yaitu *pure sine wave*, *square wave*, atau

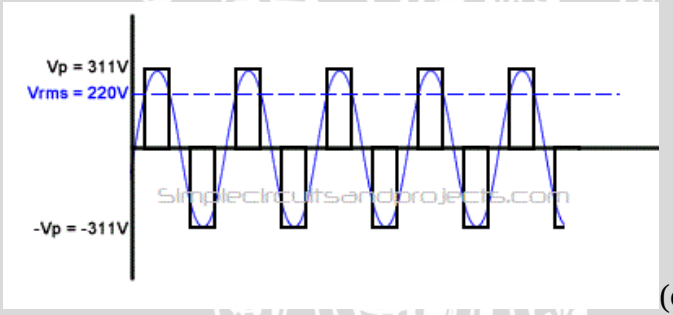
modified sine wave. Dari ketiga bentuk tersebut, bentuk *modified sine wave* sering digunakan untuk sistem *photovoltaic*. Bentuk gelombang dari ketiga jenis inverter dengan besar tegangan 220 (tegangan PLN) dapat dilihat pada Gambar 2.1.



(a)



(b)



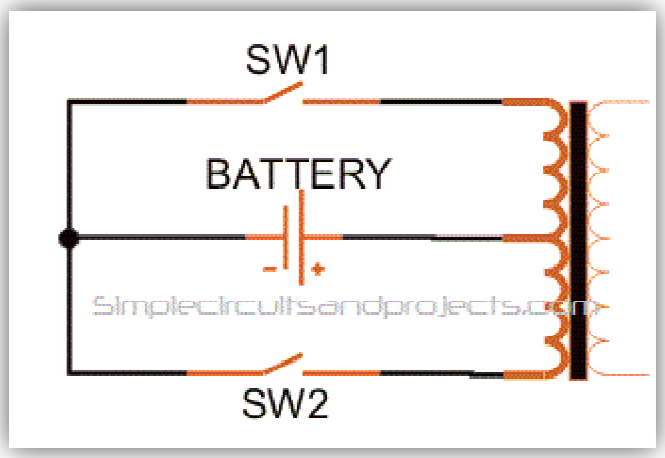
(c)

Gambar 2.1 a. Pure Sine Wave ; b. Square Wave ; c. Modified Sine Wave

Sumber : http://www.simplecircuitsandprojects.com

Bentuk *modified sine wave* merupakan gelombang *square wave* dengan 3 level tegangan yaitu *max*, nol, dan *min* (Doucet,2006). Meskipun bentuk *modified sine wave* ini dapat digunakan untuk beban-beban yang memiliki kumparan seperti pompa air, kulkas, kipas angin, dll. Bentuk ini akan meningkatkan rugi daya sistem karena terdapat harmonisa didalamnya. Salah satu inverter yang dapat menghasilkan bentuk gelombang *modified sine wave* adalah inverter center tab. Inverter ini memiliki konfigurasi rangkaian yang cukup sederhana, akan tetapi memiliki

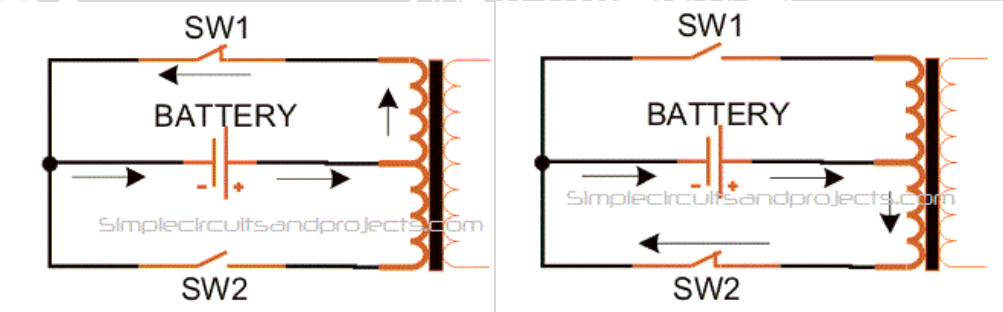
kekurangan karena hanya baik jika digunakan untuk daya < 1 kW. Untuk rangkaian sederhana dari *inverter center tap* dengan 2 buah saklar semikonduktor dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Sederhana Inverter Tap Tengah

Sumber : http://www.simplecircuitsandprojects.com

Prinsip kerja dari rangkaian ini adalah mosfet (SW1 dan SW2) akan bekerja secara bergantian atau on off bergantian. Aliran arus dari sumber DC akan mengalirkan melewati tap tengah transformator dan kembali lagi melalui mosfet yang aktif (SW1 atau SW2). Seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.

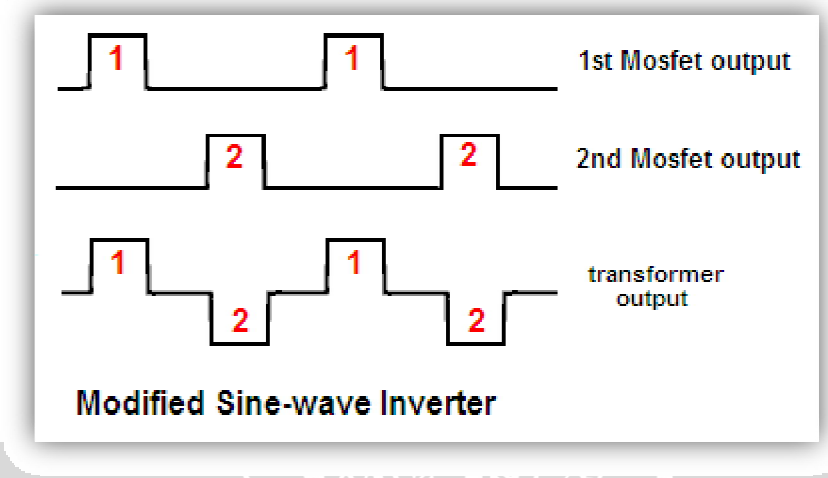


Gambar 2.3 Prinsip Kerja Inverter Tap Tengah

Sumber : http://www.simplecircuitsandprojects.com

Jadi pada kedua MOSFET akan diberikan sebuah sinyal kotak dengan lebar dan amplitudo yang sama seperti pada Gambar 2.4 MOSFET 1 akan menghasilkan

gelombang 1 dan MOSFET 2 akan menghasilkan gelombang 2, yang nantinya kedua gelombang tersebut akan membentuk gelombang *modified sine wave*. Tegangan hasil dari konfigurasi ON-OFF MOSFET akan dinaikkan dengan perbandingan n oleh transformator.



Gambar 2.4 Bentuk Gelombang Keluaran Inverter

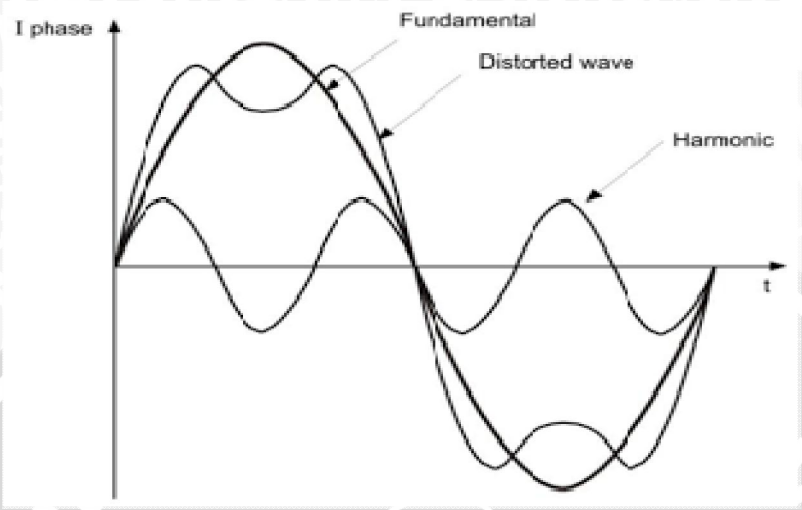
Sumber : http://www.m0ukd.com

2.2 Harmonisa

Cacat gelombang seperti Gambar 2.5 yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan komponen gelombang lain dikenal dengan harmonisa yaitu komponen gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya. Pada Gambar 2.5 terdapat gelombang fundamental (gelombang ideal), gelombang harmonisa dan gelombang real yang merupakan distorsi gelombang ideal oleh gelombang harmonisa. (Arrillaga,2003:6)

Pada umumnya analisis terhadap sistem tenaga listrik dimodelkan sebagai suatu sistem yang linear di mana sistem tersebut terdiri dari peralatan dan komponen listrik yang pasif dengan tegangan dan frekuensi yang konstan dengan sumber berbentuk gelombang sinusoidal. Tetapi dengan perkembangan beban listrik yang semakin besar dan kompleks pada saat ini, terutama penggunaan beban-beban tak linier, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya. Bentuk gelombnag

modified sine wave itu sendiri merupakan hasil dari gelombang sinusoida atau gelombang fundamental yang terdistorsi.



Gambar 2.5 Bentuk Gelombang Dasar, Harmonisa, dan Gelombang Terdistorsi

Sumber : Sankaran (2002:70)

2.2.1 Analisa Harmonisa dengan Metode 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 : (Arrillaga,2003:18)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos \omega nt + b_n \sin \omega nt) \quad (2\text{-}1)$$

dimana :

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

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

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(n\omega t)\,d(t) \quad (2\text{-}3)$$

Dalam menggunakan Metode Fourier ini terdapat syarat-syarat yang harus dipenuhi agar dapat menguraikan fungsi peiodik menjadi fungsi-fungsi sinusoida

dengan frekuensi, amplitude, dan sudut fase tertentu, syarat-syarat tersebut diantaranya : (Sudirham,2011)

1. Merupakan fungsi periodik f(t) = f(ωt+T) dengan T = periode
2. Merupakan fungsi kontinyu atau fungsi tak kontinyu dengan jumlah diskontinyuitas yang tertentu selama satu periode.
3. Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu

Dalam satu periode T, fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu.

Persamaan Fourier ini dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang fundamental dan gelombang harmonik. Hal ini yang akan menjadi dasar dalam menganalisis harmonisa. Bentuk gelombang yang terdistorsi dapat diperoleh dengan cara menjumlahkan secara aljabar gelombang fundamental dengan gelombang-gelombang harmonik yang mempunyai frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa yang bervariasi.

2.2.2 Orde Harmonik

Orde harmonik merupakan perbandingan antara frekuensi harmonik dengan frekuensi fundamental, hal ini dapat didefinisikan dengan persamaan berikut : (Sankaran,2002:71)

$$n = \frac{f_n}{F} \qquad (2\text{-}4)$$

dimana :

n = orde harmonik

f_n = frekuensi harmonik ke-n

F = frekuensi dasar

Karena frekuensi harmonik ke-1 merupakan frekuensi fundamental maka frekuensi harmonik dimulai dari orde ke-2 sampai ke-n.

2.2.3 Nilai RMS

Nilai RMS (*Root Maen Square*) dari gelombang non-sinusoida seperti gelombang *modified sine wave* dapat didefinisikan oleh persamaan berikut : (Sankaran,2002:78)

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} {F_n}^2} = \sqrt{{F_1}^2 + {F_n}^2} \qquad (2\text{-}5)$$

dimana :

F_{RMS} = tegangan atau arus saat terdistorsi

T = periode (detik)

F_1 = tegangan atau arus fundamental

F_n = tegangan atau arus harmonik

2.3 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. Motor induksi satu fasa sering digunakan sebagai penggerak pada peralatan rumah tangga yang memerlukan daya rendah dan kecepatan yang relatif konstan. Hal ini disebabkan karena motor induksi satu fasa memiliki beberapa kelebihan yaitu konstruksi yang cukup sederhana, kecepatan putar yang hampir konstan terhadap perubahan beban. (Zuhal,1991:129)

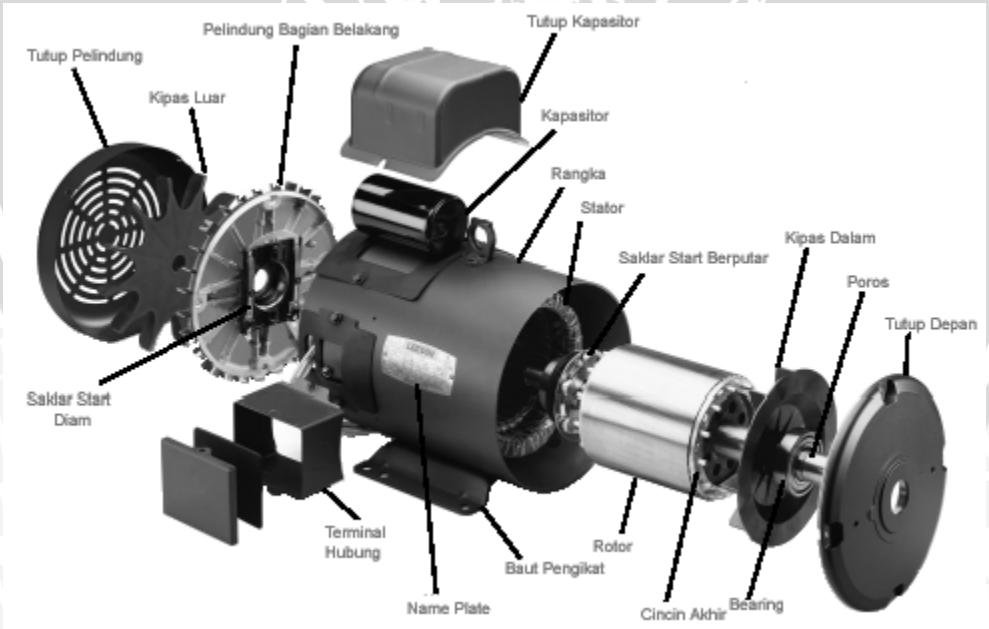
Pada umumnya motor induksi satu fasa sering digunakan pada sumber jala-jala satu fasa yang banyak terdapat pada peralatan rumah tangga. Walaupun demikian motor ini juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu kapasitas pembebanan yang relatif rendah, tidak dapat melakukan pengasutan sendiri tanpa pertolongan alat bantu dan efisiensi yang rendah.

2.3.1 Konstruksi Motor Induksi Satu Fasa

Konstruksi motor induksi satu fasa hampir sama dengan konstruksi motor induksi tiga fasa kecuali pada kumparan statornya yang terdiri dari satu fasa. Rotor maupun stator merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk silinder dan simetris. (Zuhal,1991:129) Diantaranya terdapat celah udara yang sempit. Bagian-bagian pada motor induksi satu fasa dapat dilihat pada Gambar 2.6 mulai dari rotor, stator, kipas, saklar, dll.

Stator merupakan bagian yang diam sebagai rangka tempat kumparan stator yang terpasang. Stator terdiri dari inti stator, kumparan stator, dan alur stator. Motor induksi satu fasa dilengkapi dengan dua kumparan stator yang dipasang terpisah, yaitu kumparan utama (*main winding*) atau sering disebut dengan kumparan berputar dan kumparan bantu (*auxiliary winding*) atau sering disebut dengan kumparan start.

Rotor merupakan bagian yang berputar. Bagian ini terdiri dari : inti rotor, kumparan rotor dan alur rotor. Pada umumnya ada dua jenis rotor yang sering digunakan pada motor induksi, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar (*squirrel cage rotor*).

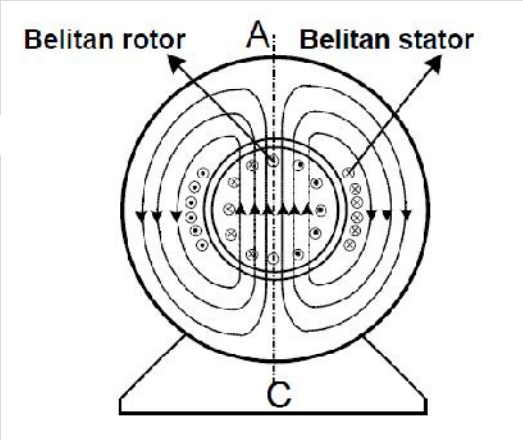


Gambar 2.6 Konstruksi Umum Motor Induksi Satu Fasa

Sumber : Wahyudinata (2010:6)

2.3.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Satu Fasa

Prinsip kerja motor induksi satu fasa dapat dijelaskan dengan menggunakan teori medan putar silang (*cross-field theory*). Jika motor induksi satu fasa diberikan tegangan bolak-balik satu fasa maka arus bolak-balik akan mengalir pada kumparan stator yang kemudian akan menginduksi rotor ketika rotor telah berputar. (Chapman,2005:643) Arus pada kumparan stator ini akan menghasilkan medan magnet seperti yang di tunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 2.7.

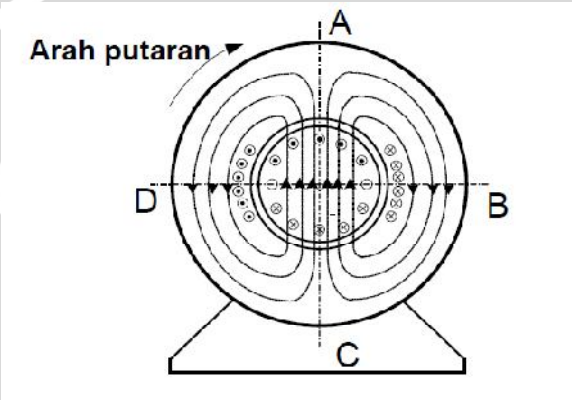


Gambar 2.7 Medan Magnet Stator
Sumber : Wahyudinata (2010:16)

Arus stator yang mengalir setengah periode pertama akan membentuk kutub utara di A dan kutub selatan di C pada permukaan stator. Pada setengah periode berikutnya, arah kutub-kutub stator menjadi terbalik. Meskipun kuat medan magnet stator berubah-ubah yaitu maksimum pada saat arus maksimum dan nol pada saat arus nol serta polaritasnya terbalik secara periodik, aksi ini akan terjadi hanya sepanjang sumbu A-C. Dengan demikian, medan magnet ini tidak berputar tetapi hanya merupakan sebuah medan magnet yang berpulsa pada posisi yang tetap (*stationary*). (Wahyudinata,2010:16)

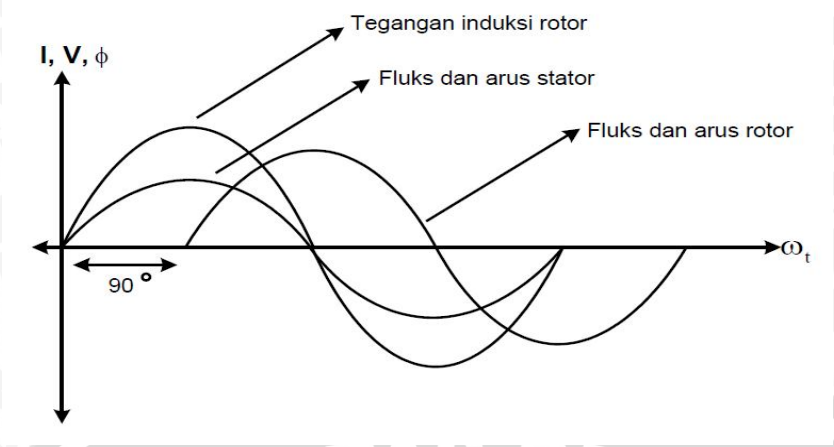
Seperti halnya pada transformator, tegangan terinduksi pada belitan sekunder, dalam hal ini adalah kumparan rotor. Karena rotor dari motor induksi satu fasa pada umumnya adalah rotor sangkar dimana belitannya terhubung singkat, maka arus akan mengalir pada kumparan rotor tersebut. Sesuai dengan hukum Lorenz, arah dari arus ini (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7) adalah sedemikian rupa sehingga

medan magnet yang dihasilkan melawan medan magnet yang menghasilkannya. Arus rotor ini akan menghasilkan medan magnet rotor dan membentuk kutub-kutub pada permukaan rotor. Karena kutub-kutub ini juga berada pada sumbu A-C dengan arah yang berlawanan terhadap kutub-kutub stator, maka tidak ada momen putar yang dihasilkan pada kedua arah sehingga rotor tetap diam. Dengan demikian, motor induksi satu fasa tidak dapat diasut sendiri dan membutuhkan rangkaian bantu untuk menjalankannya. (Wahyudinata,2010:16)



Gambar 2.8. Motor Dalam Keadaan Berputar
Sumber : Wahyudinata (2010:17)

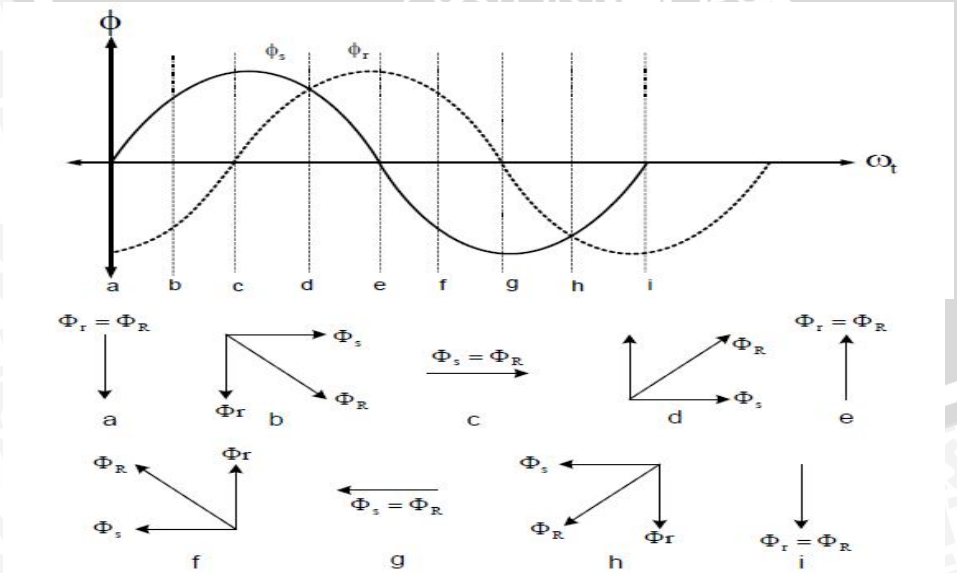
Motor induksi akan dapat berputar bila diberi rangkaian bantu atau diputar secara manual dengan menggunakan tangan untuk *starting*. Saat berputar seperti pada Gambar 2.8, maka konduktor-konduktor rotor akan berpotongan dengan medan magnet stator yang akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) rotor. Dengan menggunakan kaidah tangan kanan Fleming maka arah gaya gerak listrik akan mengarah keluar pada setengah bagian atas rotor. Dan mengarah ke dalam pada setengah bagian bawah rotor. Kemudian pada setengah periode selanjutnya, gaya gerak listrik yang dibangkitkan oleh rotor akan terbalik. (Wahyudinata,2010:17)



Gambar 2.9 Fluksi Rotor Tertinggal 90^o Terhadap Fluks Stator

Sumber : Wahyudinata (2010:18)

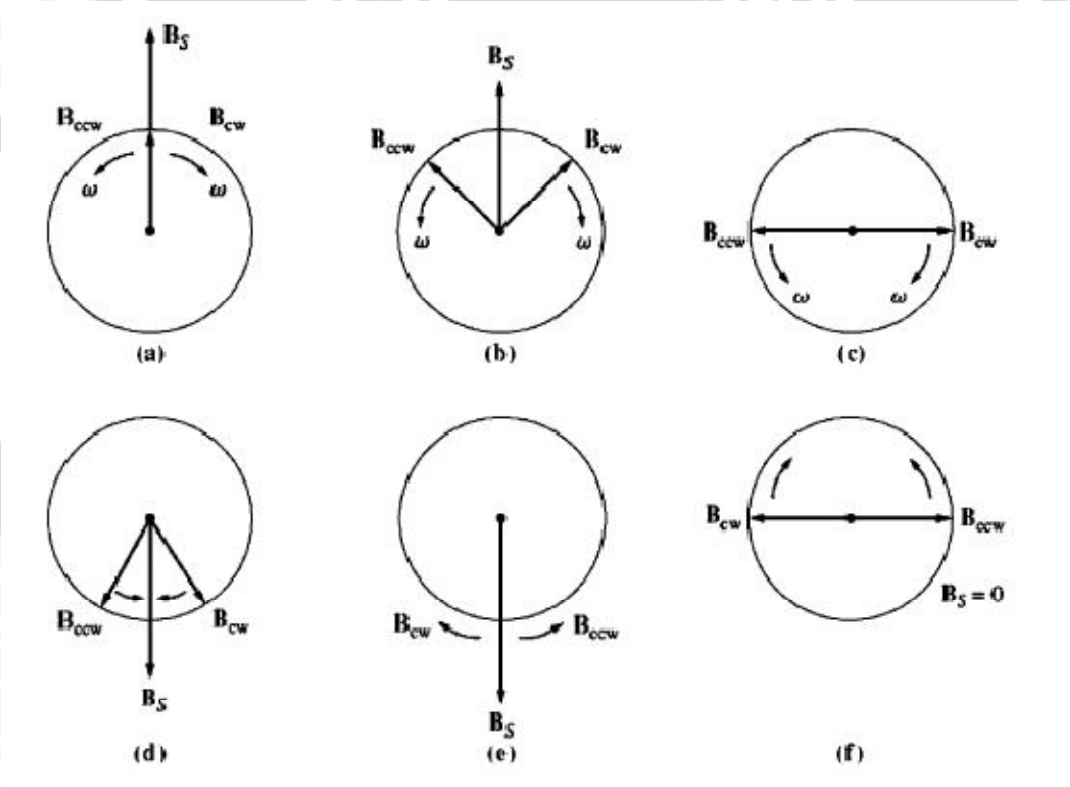
Karena bahan dari konduktor-konduktor rotor terdiri dari resistansi rendah dan induktansi tinggi maka, arus yang dihasilkan pada rotor akan tertinggal mendekati 90^o terhadap gaya gerak listrik stator (seperti pada Gambar 2.9). Arus rotor yang tertinggal 90^o ini akan menghasilakn medan magnet yang tertinggal 90^o juga. Perbedaan fasa 90^o antara medan magnet stator dengan medan magnet rotor ini yang biasa disebut medan silang (*cross field*).(Chapman,2005:643) Sehingga perputaran pada motor induksi satu fasa ditimbulkan akibat resultan medan magnet antara medan magnet stator dengan medan magnet rotor yang terlihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Resultan Medan Magnet Stator dengan Rotor

Sumber : Sen (1996:375)

Selain teori medan putar silang terdapat teori medan putar ganda (*double revolving-field theory*) yang dapat menjelaskan prinsip kerja dari motor induksi satu fasa. Menurut teori medan putar ganda, fluks yang dihasilkan saat kondisi diam merupakan resultan dari fluks arah maju dengan fluks arah mundur. Dimana besar dari kedua fluks ini sama besar dan berputar pada arah yang berlawanan. (Sen,1996:374) Teori ini dapat dijelaskan melalui Gambar 2.11 dimana fluks sinusoida yang memilki fluks maksimum sebesar $\emptyset_m$ memiliki dua komponen fluks B_{ccw} dan B_{cw} yang besarnya sama, yaitu sebesar $\emptyset_m/2$. Dan berputar sesuai yang ditunjukkan arah panah.

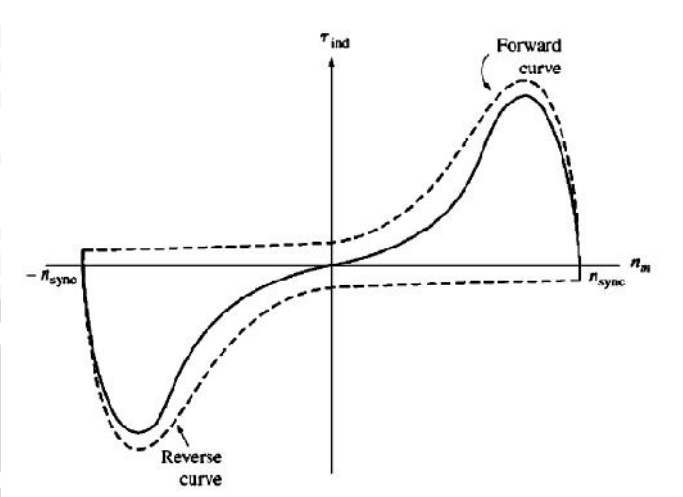


Gambar 2.11 Konsep Medan Putar Ganda

Sumber : Chapman (2005:639)

Kedua fluks tersebut masing-maing akan menginduksi konduktor dan menghasilkan ggl, sehingga akan timbul torsi sendiri yaitu torsi arah maju dan torsi arah mundur. Kedua torsi tersebut memiliki arah yang berlawanan seperti yang terlihat pada Gambar 2.12. Pada keadaan diam kedua torsi memiliki besar yang sama sehingga torsi asut sama dengan nol. Dan ketika berputar resultan dari kedua torsi

tersebut yang akan mengakibatkan motor tetap berputar pada putarannya. (Chapman,2005:639)



Gambar 2.12 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa

Sumber : Chapman (2005:642)

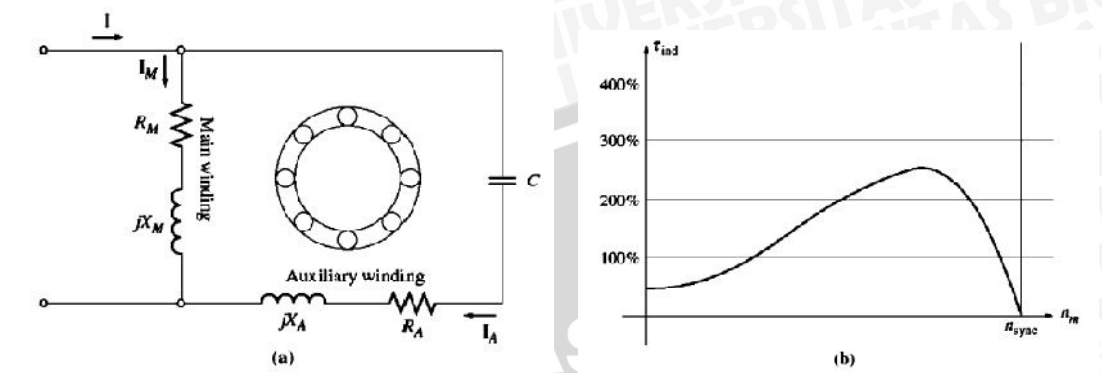
2.3.3 Jenis Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa memiliki beberapa jenis dalam menerapkan cara-cara yang digunakan untuk menghasilkan beda fasa antara arus pada kumparan bantu dengan arus pada kumparan utama. Pada penelitian ini digunakan motor induksi satu fasa pada kipas angin, yaitu motor induksi jenis *permanent split capacitor*.

Motor *permannet split capacitor* mempunyai kapasitor yang dihubungkan seri dengan kumparan bantu dan terhubung paralel dengan kumparan utama yang dihubung langsung dengan sumber. Motor jenis ini memilki konstruksi yang lebih sederhan dari pada motor jenis kapasitor start karena tidak membutuhkan saklar sentrifugal. Pada saat beban nominal, motor jenis memilki efisiensi lebih besar dan faktor daya yang lebih besar serta torsi yang lebih halus dari pada motor induksi satu fasa jenis lain. (Chapman,2005:650)

Motor jenis ini banyak digunakan pada peralatan yang berdaya rendah. Tipe motor ini kopel awalnya kurang bagus, hal ini disebabkan karena besar kapasitor mengakibatkan arus pada kumparan utama dan kumparan bantu menjadi seimbang. Karena itu besar torsi awal tidak sebesar pada jenis motor induksi kapasitor start.

(Chapman,2005:650) Untuk lebih jelasnya rangkaian motor running kapasitor dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. *Permanent Capacitor Motor* (a) Rangkaian (b) Karakteristik Torsi-Kecepatan

Sumber : Chapman (2005:652)

Rangkaian ekivalen motor ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.a. kapasitor dihubungkan seri dengan kumparan bantu dan tidak dilepas setelah pengasutan dilakukan dan tetap tinggal pada rangkaian. Hal ini menyederhanakan konstruksi dan mengurangi biaya serta memperbaiki ketahanan motor karena saklar sentrifugal tidak digunakan. Faktor daya, dan efisiensi akan lebih baik karena motor berputar seperti motor dua fasa. Karakteristik momen putar – kecepatan motor ini ditunjukkan pada Gambar 2.13.b. Jenis kapasitor yang digunakan adalah kapasitor kertas.

Adapun jenis jenis motor yang digunakan pada motor induksi satu fasa yang memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda-beda. Perbedaan dari masing – masing kelas pada motor induksi adalah sebagai berikut : (Chapman,2005:421)

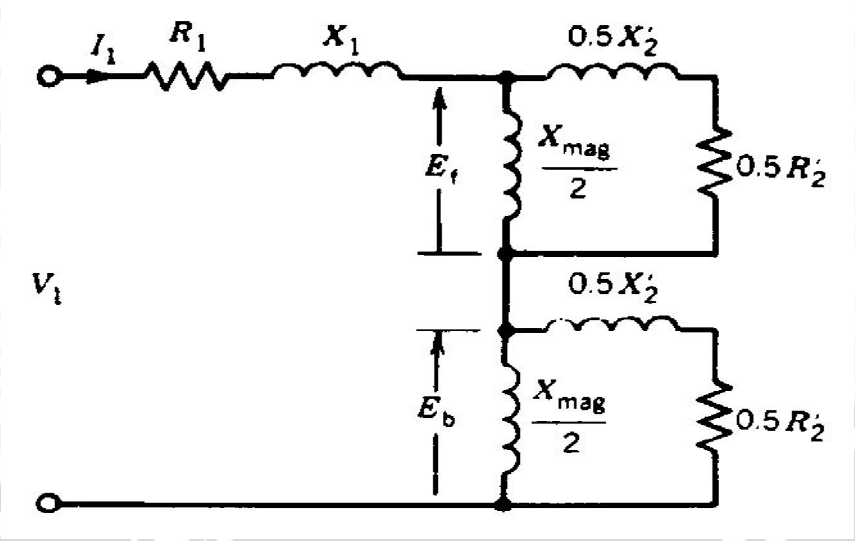
1. Kelas A : Torsi start normal, arus start normal dan slip kecil. Tipe ini umumnya memiliki tahanan rotor sangkar yang rendah. Slip pada beban penuh kecil atau rendah namun efisiensinya tinggi. Torsi maksimum biasanya sekitar 21% dari torsi beban penuh dan slipnya kurang dari 21%. Motor kelas ini berkisar hingga 20 Hp.

2. Kelas B : Torsi start normal, arus start kecil dan slip rendah. Torsi start kelas ini hampir sama dengan kelas A tetapi arus startnya berkisar 75%Ifl . Slip dan efisiensi pada beban penuh juga baik. Kelas ini umumnya berkisar antara 7,5 Hp sampai dengan 200 Hp. Penggunaan motor ini antara lain : kipas angin, boiler, pompa dan lainnya.
3. Kelas C : Torsi start tinggi dan arus start kecil. Kelas ini memiliki resistansi rotor sangkar yang ganda yang lebih besar dibandingkan dengan kelas B. Oleh sebab itu dihasilkan torsi start yang lebih tinggi pada arus start yang rendah, namun bekerja pada efisisensi dan slip yang rendah dibandingkan kelas A dan B.
4. Kelas D : Tosi start tinggi, slip tinggi. Kelas ini biasanya memiliki resistansi rotor sangkar tunggal yang tinggi sehingga dihasilkan torsi start yang tinggi pada arus start yang rendah Sebagai tambahan pada keempat kelas tersebut diatas, NEMA juga memperkenalkan disain kelas E dan F, yang sering disebut motor induksi *soft- start*, namun disain kelas ini sekarang sudah ditinggalkan.

2.3.4 Rangkaian Pengganti Motor Induksi Satu Fasa

Pada konsep medan putar ganda menjelaskan bahwa fluks yang dihasilkan merupakan resultan dari dua buah fluks yang memiliki besar yang sama dan berputar pada arah yang berlawanan pada kecepatan sinkron. Masing-masing fluks tersebut akan berdampak pada arus rotor yang dihasilkan sehingga menghasilkan gerak motor induksi seperti pada motor induksi fasa banyak.

Dengan menggunakan konsep medan putar fluks yang dihasilkan kumparan stator dapat dipecah menjadi dua bagian yaitu medan putar maju dan medan putar mundur. Kedua medan putar ini akan mengimbaskan ggl pada kumparan rotor sehingga tahanan dan reaktansi pada kumparan rotor diekivalenkan masing-masing adalah setengah dari nilai tahanan dan reaktansi kumparan rotor sesungguhnya, yaitu R2/2 dan X2/2 (Sen,1996:379) seperti yang terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Motor Induksi Satu Fasa dalam Keadaan Diam

Sumber : Sen (1996:379)

Pada saat berputar dan bekerja hanya pada kumparan utama. Pada arah medan maju akan ada slip (s^+) dengan arus rotor yang diakibatkan oleh medan maju mempunyai frekuensi s.f, dimana f adalah frekuensi stator. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak maju pada kecepatan slip. Fluks ini akan membangkitkan ggl dengan arah maju pada kumparan utama stator. Pangaruh pada rotor jika dilihat dari sisi stator dapat dinyatakan sebagai suatu impedansi sebesar 0,5 R2/s^+ + j 0,5X2 paralel dengan 0,5Xm.(Sen,1996:380) Seperti yang terlihat pada Gambar 2.15.

Pada arah medan putar mundur, rotor tetap bergerak dengan slip s^+ berpatokan pada medan maju dan besarnya kecepatan putar medan maju adalah (Sen,1996:377)

$$n = 1 - s^+ \qquad (2\text{-}6)$$

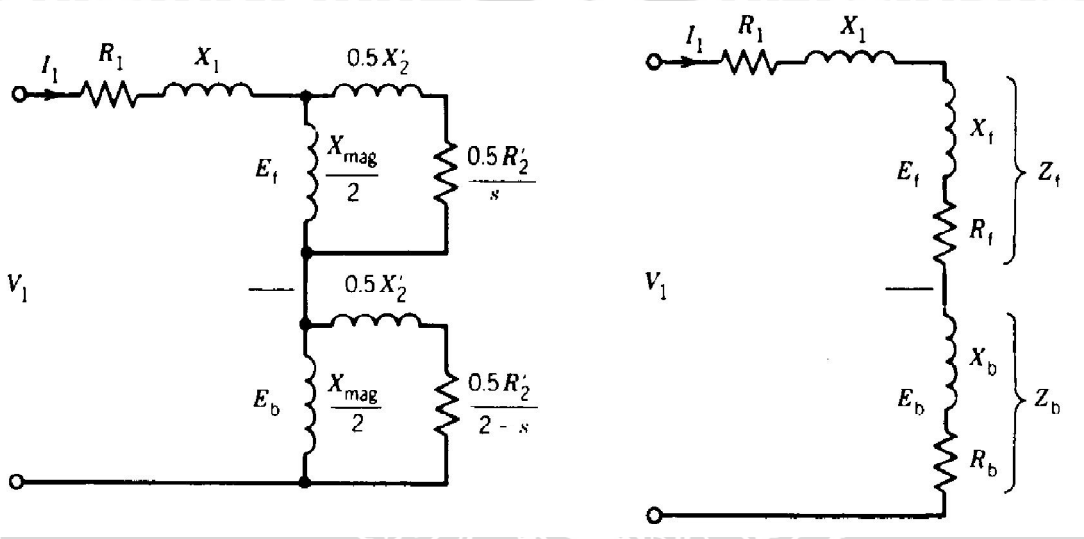
Kecepatan relatif motor dengan berpatokan pada medan mundur adalah 1 + n, atau besarnya slip (s^-) terhadap medan mundur adalah (Sen,1996:377)

$$s^- = 1 + n$$

$$s^- = 2 - (1 - n)$$

$$s^- = 2 - s^+ \qquad (2\text{-}7)$$

Selanjutnya medan mundur menghasilkan arus rotor dengan frekuensi (2 – s)f. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak mundur. Fluks ini akan menimbulkan ggl pada medan mundur kumparan stator. Pengaruh tersebut dapat diperlihatkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Motor Induksi Satu Fasa dalam Keadaan Berputar

Sumber : Sen (1996:379)

Dari rangkaian diatas dapat dihitung besar dari arus rotor, arus stator, daya masukkan, dan faktor daya dengan sembarang nilai slip, apabila tegangan serta impedansi motor diketahui. Dari rangkaian ekivalen tersebut didapatkan : (Sen,1990:381)

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{R'_2}{s}+jX'_2\right)jX_m}{\left(\frac{R'_2}{s}+jX'_2\right)+jX_m} \quad \Omega \qquad (2\text{-}8)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{R'_2}{(2-s)}+jX'_2\right)jX_m}{\left(\frac{R'_2}{(2-s)}+jX'_2\right)+jX_m} \quad \Omega \qquad (2\text{-}9)$$

Dimana :

R_1 = Resistansi kumparan stator (ohm)

R_2’ = Resistansi kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

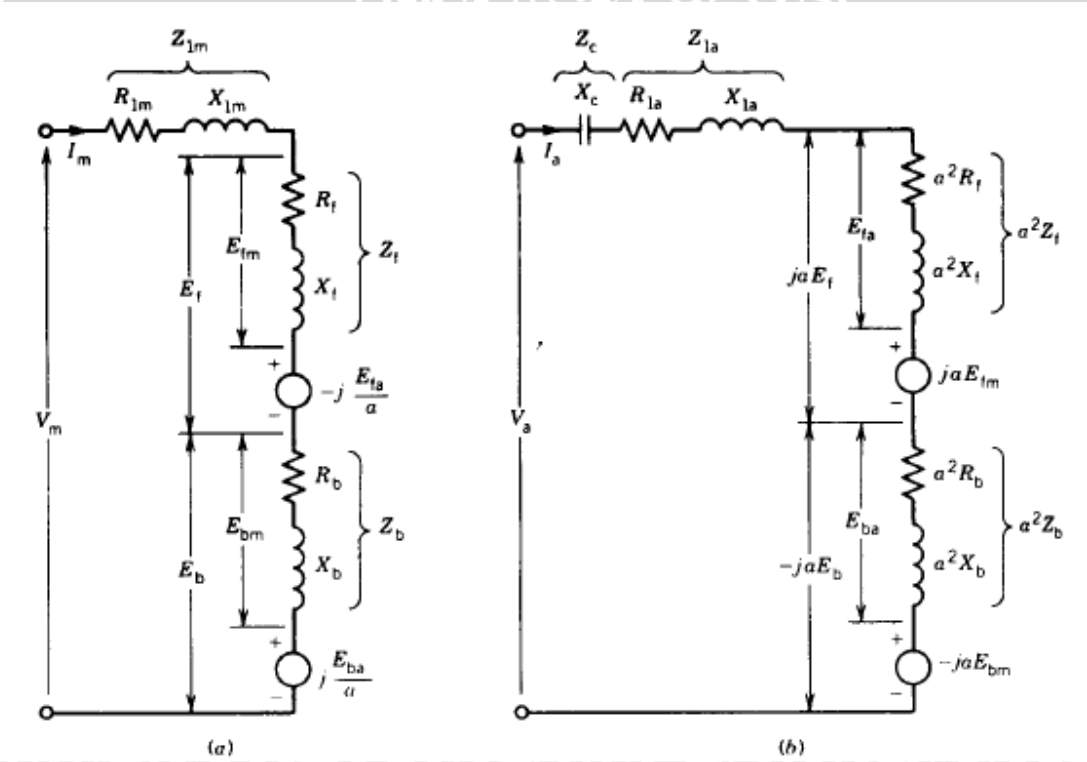
X_1 = Reaktansi bocor kumparan stator (ohm)

X_2' = Reaktansi bocor kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

Xm = Reaktansi pemagnetan (ohm)

Dari setiap jenis motor induksi satu fasa memilki perbedaan dari rangkaian ekivalen. Untuk jenis *permanent split capacitor* kumparan bantu tetap menghasilkan medan putar arah maju dan medan putar arah mundur saat motor telah berputar, sehingga pada masing-masing kumparan utama dan kumparan bantu akan menghasilkan sepasang medan putar arah maju dan medan putar arah mundur. Kedua kumparan ini akan terhubung paralel seperti yang terlihat pada Gambar 2.13.a. dengan kapasitor terhubung seri dengan kumparan bantu.

Tiap-tiap kumparan dapat ditunjukkan dengan suatu rangkaian ekivalen dengan dua percabangan paralel, satu untuk medan arah maju, dan satu lagi untuk medan arah mundur. Rangkaian ekivalen dari motor kapasitor permanen diperlihatkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Rangkaian Ekivalen Motor *Permanent Split Capacitor Capacitor* Motor Induksi Satu Fasa (a) Kumparan Utama (b) Kumparan Bantu

Sumber : Sen (1996:404)

dimana :

Vm = Tegangan masukan motor pada kumparan utama

Va = Tegangan masukan motor pada kumparan bantu

R1m = Resistansi pada kumparan utama stator

X1m = Reaktansi pada kumparan utama stator

R1a = Resistansi pada kumparan bantu stator

X1a = Reaktansi pada kumparan bantu stator

Xc = Reaktansi kapasitor permanen

a = Konstanta perbandingan belitan kumparan bantu dan beliatan kumparan utama

Efa = Tegangan yang diinduksikan dalam cabang arah maju dari kumparan utama oleh medan putar arah maju dari kumparan bantu.

Eba = Tegangan yang diinduksikan dalam cabang arah mundur dari kumparan utama oleh medan putar arah mundur dari kumparan bantu.

Efm = Tegangan yang diinduksikan dalam cabang arah maju dari kumparan bantu oleh medan putar arah maju dari kumparan utama.

Ebm = Tegangan yang diinduksikan dalam cabang arah mundur dari kumparan bantu oleh medan putar arah maju dari kumparan utama.

Dari rangkaian ekivalen tersebut dapat dibuat persamaan dari tegangan-tegangan tiap kumparan. Untuk kumparan utama didapatkan persamaan tegangan sebagai berikut : (Sen;1996:404)

$$V_m = I_m(R_{1m} + X_{1m}) + E_{fm} + E_{bm} - j\frac{E_{fa}}{a} + j\frac{E_{ba}}{a} \quad (2\text{-}10)$$

dan kumparan bantu :

$$V_a = I_a(R_{1a} + X_{1a} + X_c) + E_{fa} + E_{ba} - jaE_{bm} + jaE_{fm} \quad (2\text{-}11)$$

Persamaan di atas dapat ditulis kembali dengan asumsi Vm=Va=V_1 : (Sen;1996:404)

$$I_m Z_{11} + I_a Z_{12} = V_1 \quad (2\text{-}12)$$

$$I_m Z_{21} + I_a Z_{22} = V_1 \quad (2\text{-}13)$$

dimana :

$$Z_{11} = R_{1m} + Z_f + Z_b + jX_1 \quad (2\text{-}14)$$

$$Z_{12} = -ja(Z_f - Z_b) \quad (2\text{-}15)$$

$$Z_{21} = ja(Z_f - Z_b) \quad (2\text{-}16)$$

$$Z_{22} = Z_a + a^2(Z_f + Z_b + jX_1) \quad (2\text{-}17)$$

Dari persamaan-persamaan di atas dapat dibuat persamaan untuk mendapatkan arus pada tiap kumparan sebagai berikut : (Sen;1996:407)

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{V}_1(Z_{22}-Z_{12})}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}} \quad (2\text{-}18)$$

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_1(Z_{11}-Z_{21})}{Z_{11}Z_{22}-Z_{12}Z_{21}} \quad (2\text{-}19)$$

2.3.5 Penentuan Parameter Motor Induksi Satu Fasa

Dalam menentukan parameter motor induksi satu fasa diperlukan 3 pengujian yaitu pengujian blok rotor, pengujian sumber DC dan pengujian tanpa beban.

1. Pengujian Sumber DC

Pada pengujian ini dilakukan pengujian dengan menggunakan sumber DC yang nantinya akan didapatkan besarnya resisitansi pada kumparan stator baik kumparan bantu dan kumparan utama. Karena hasil yang diperolah merupakan resistansi saat diberi sumber DC sedangkan motor itu sendiri dijalankan dengan menggunakan sumber AC maka diperlukan faktor koreksi akibat *skin effect* sebesar 1,3.(Wahyudinata,2010:41) Dengan menggunakan persamaan dibawah ini akan didapatkan besarnya resistansi pada kumparan utama. (Chapman,2005:455)

$$R_{DC1} = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} \quad (2\text{-}20)$$

$$R_{1m} = 1{,}3R_{DC1} \quad (2\text{-}21)$$

dimana :

R_{DC1} = Resistansi saat diberi sumber DC ke 1

V_{DC1} = Tegangan saat diberi sumber DC ke 1

I_{DC1} = Arus saat diberi sumber DC ke 1

R_{1m} = Resistansi pada kumparan utama

Dan dengan menggunakan persamaan di bawah ini akan memperoleh besarnya resistansi pada kumparan bantu.

$$R_{DC2} = \frac{V_{DC2}}{I_{DC2}} \quad (2\text{-}22)$$

$$R_{1a} = 1{,}3\frac{R_{1m}R_{DC2}}{R_{1m}-R_{DC2}} \quad (2\text{-}23)$$

dimana :

R_{DC2} = Resistansi saat diberi sumber DC ke 2

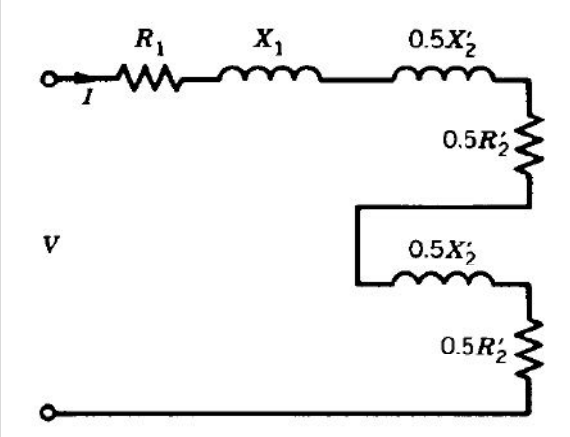
V_{DC2} = Tegangan saat diberi sumber DC ke 2

I_{DC2} = Arus saat diberi sumber DC ke 2

R_{1a} = Resistansi pada kumparan bantu

2. Pengujian Rotor Ditahan

Saat rotor dipaksa untuk tidak berputar maka putaran rotor akan bernilai nol dan s akan bernilai 1. Dengan mengasumsikan bahwa nilai Xm lebih besar dari impedansi pada rotor maka arus yang melewati Xm sangat kecil, sehingga Xm dapat diabaikan seperti yang terlihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Satu Fasa Saat Blok Rotor

Sumber : Sen (1996:383)

Dengan menggunakan persamaan dibawah ini maka akan diperoleh parameter-parameter X_1, X_2', dan R_2' dati motor induksi satu fasa. (Chapman,2005:457)

$$R_{eq} = \frac{P_{BR}}{{I_{BR}}^2} \quad (2\text{-}24)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} \quad (2\text{-}25)$$

$$X_{eq} = \sqrt{{Z_{eq}}^2 - {R_{eq}}^2} \quad (2\text{-}26)$$

dimana :

V_{BR} = Tegangan saat rotor ditahan

I_{BR} = Arus saat rotor ditahan

P_{BR} = Daya saat rotor ditahan

R_{eq} = Resistansi ekivalen

Z_{eq} = Impedansi ekivalen

X_{eq} = Reaktansi ekivalen

Dengan melihat jenis dari motor induksi satu fasa, melalui tabel distribusi empiris maka dapat dicari besar dari X_1 dan X_2'. Dan persamaan yang digunakan untuk memperoleh parameter R_2' adalah sebagai berikut : (Chapman,2005:457)

$$R_2' = R_{eq} - R_1 \quad (2\text{-}27)$$

Tabel 2.1 Distribusi Empiris dari X_{BR}

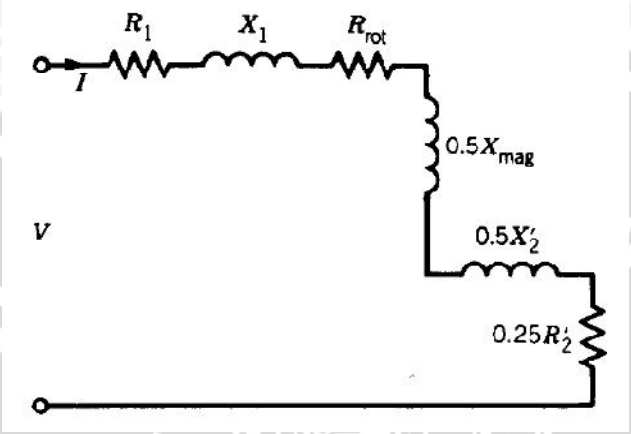
Desain Kelas Motor	X_1	X_2'
Kelas A	0,5 X_{BR}	0,5 X_{BR}
Kelas B	0,4 X_{BR}	0,6 X_{BR}
Kelas C	0,3 X_{BR}	0,7 X_{BR}
Kelas D	0,5 X_{BR}	0,5 X_{BR}
Rotor Belitan	0,5 X_{BR}	0,5 X_{BR}

Sumber : Chapman (2005:458)

3. Pengujian Tanpa Beban

Kumparan bantu dan kumparan utama digunakan pada saat awal menjalankan motor, tetapi setelah berputar kumparan bantu dapat diasumsikan open, karena nilai impedansi lebih besar dari kumparan utama. Ketika motor induksi berputar tanpa beban maka putaran rotor (n_r) akan sama dengan putaran sinkron (n_s) sehingga nilai s akan bernilai 0. Jadi besar s_f (slip *forward*)

akan mendekati nol sedangkan s_b (slip *backward*) akan mendekati 2, sehingga impedansi *forward* sekunder akan lebih besar dibandingkan reaktansi pemagnetan dan tahanan inti besi sedangkan impedansi *backward* akan lebih kecil dari reaktansi pemagnetan dan tahanan inti besi. Sehingga rangkaian ekivalen motor induksi saat tanpa beban seperti terlihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Satu Fasa Saat Tanpa Beban

Sumber : Sen (1996:383)

Dari rangkaian ekivalen saat tanpa beban didapatkan persamaan-persamaan sebagai berikut : (Wahyudinata,2010:44)

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \quad (2\text{-}28)$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{{I_{NL}}^2} \quad (2\text{-}29)$$

$$X_{NL} = \sqrt{{Z_{NL}}^2 - {R_{NL}}^2} \quad (2\text{-}30)$$

dimana :

V_{NL} = Tegangan saat tanpa beban

I_{NL} = Arus saat tanpa beban

P_{NL} = Daya saat tanpa beban

R_{NL} = Resistansi saat tanpa beban

Z_{NL} = Impedansi saat tanpa beban

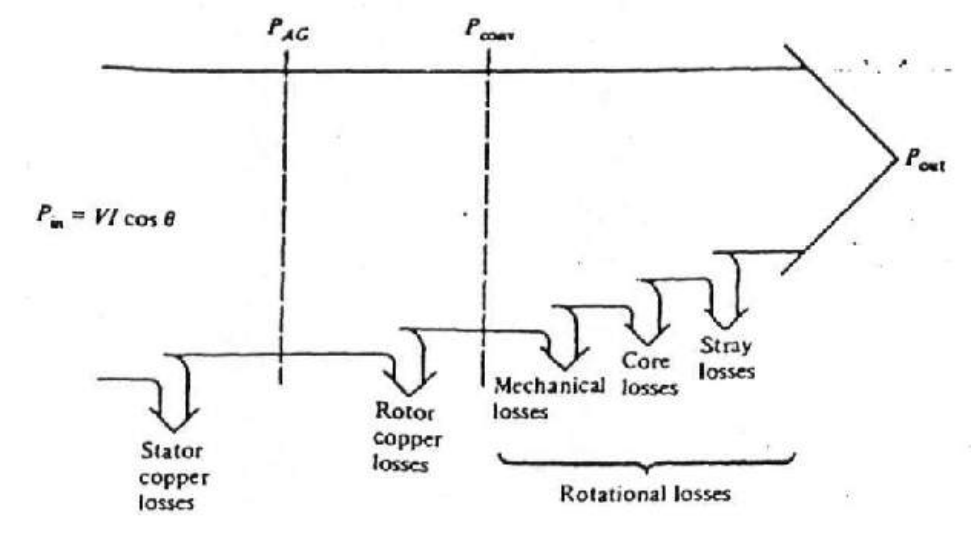
X_{NL} = Reaktansi saat tanpa beban

Dan untuk Xm :

$$X_m = 2X_{NL} - 2X_1 - X'_2 \quad (2\text{-}31)$$

2.3.6 Daya Dan Torsi Pada Motor Induksi Satu Fasa

Motor Induksi merupakan mesin listrik yang mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanis. Pada saat terjadi perubahan energi maka akan timbul kerugian-kerugian yang tidak dapat dihindarkan. Kerugian kerugian pada motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.17 mulai dari rugi tembaga pada rotor dan stator hingga rugi putaran rotor.



Gambar 2.19 Diagram Aliran Daya Pada Motor Induksi Satu Fasa

Sumber : Chapman (2005:660)

Diantara rotor dan stator terdapat celah udara, dimana besar dari daya celah udara ini merupakan selisih dari daya celah udara pada medan maju dengan medan mundur. Daya celah udara dapat didefinisikan sebagai berikut : (Sen,1996:405)

$$P_{AG,f} = \left(I_m{}^2 + a^2 I_a{}^2\right)0{,}5R_f + 2aI_m I_a R_f \sin(\theta_a - \theta_m) \text{ W} \quad (2\text{-}32)$$

$$P_{AG,b} = \left(I_m{}^2 + a^2 I_a{}^2\right)0{,}5R_b + 2aI_m I_a R_b \sin(\theta_a - \theta_m) \text{ W} \quad (2\text{-}33)$$

$$P_{AG} = P_{AG.f} - P_{AG.b} \text{ W} \quad (2\text{-}34)$$

dimana :

P_{AG} = Daya celah udara (Watt)

$P_{AG.f}$ = Daya celah udara pada medan maju (Watt)

$P_{AG.b}$ = Daya celah udara pada medan mundur (Watt)

Rugi-rugi tembaga pada motor induksi merupakan rugi-rugi variabel, yaitu rugi-rugi yang berubah-ubah sesuai dengan beban dan sumber tegangan. Rugi-rugi tembaga terdiri dari rugi tembaga pada stator dan rugi tembaga pada rotor. Rugi pada stator merupakan daya yang dikonsumsi oleh resistor R_{1m} dan R_{1a} : (Chapman,2005:662)

$$P_{SCL} = {I_m}^2 . R_{1m} + {I_a}^2 . R_{1a} \quad (2\text{-}35)$$

Sedangkan pada rotor, merupakan penjumlahan dari dua buah rugi tembaga rotor medan maju dengan rotor medan mundur. (Chapman,2005:662)

$$P_{RCL} = P_{RCL.f} + P_{RCL.b} \quad (2\text{-}35)$$

Seperti halnya pada motor induksi tiga fasa bahwa besar dari rugi tembaga rotor sama dengan pergerakan relatif perunit antara medan stator (slip) dikalikan dengan daya celah udara dari motor. Jadi untuk rugi tembaga rotor motor induksi satu fasa pada medan maju : (Chapman,2005:662)

$$P_{RCL,f} = s . P_{AG,f} \quad (2\text{-}36)$$

dan untuk medan mundur :

$$P_{RCL,b} = (2 - s) . P_{AG,b} \quad (2\text{-}37)$$

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 : (Chapman,2005:662)

$$P_{CL} = P_{SCL} + P_{RCL} = {I_{1m}}^2 . R_{1m} + {I_{1a}}^2 . R_{1a} + s . P_{AG,f} + (2 - s) . P_{AG,b} \quad (2\text{-}38)$$

dimana :

P_{CL} = Rugi daya tembaga (Watt)

P_{SCL} = Rugi daya tembaga pada stator (Watt)

P_{RCL} = Rugi daya tembaga pada rotor (Watt)

Selain itu rugi-rugi juga terjadi pada inti dan juga rugi mekanik yang pada Gambar 2.17 terlihat sebagai *rotational losses*. Rugi daya ini dapat didefinisikan melalui persamaan berikut : (Sen,1996:384)

$$P_{rot} = P_{NL} - {I_{NL}}^2 \left(R_1 + \frac{R\prime_2}{4}\right) \quad (2\text{-}39)$$

dimana :

P_{rot} = Rugi-rugi inti dan mekanik (Watt)

P_{NL} = Daya masukan saat tanpa beban (Watt)

I_{NL} = Arus masukan saat atanpa beban (A)

Dan daya keluaran dari motor induksi adalah (Zuhal,1991:78)

$$P_{out} = P_{in} - P_{rugi-rugi} \quad (2\text{-}40)$$

Dengan mengetahui rugi-rugi daya serta daya keluaran dari motor induksi satu fasa, dapat ditentukan besar dari efisiensi motor induksi satu fasa. Efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan yang didefiniskan melalui persamaan di bawah ini. (Zuhal,1991:78)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} x100\% \quad (2\text{-}41)$$

Torsi yang terinduksi dalam motor induksi tiga fasa dapat diterapkan pada motor induksi satu fasa, yaitu : (Sen,1996:385)

$$T = \frac{1}{\omega_{sync}} \frac{{V_1}^2}{\left((R_1+R_f+R_b)+j(X_1+X_f+X_b)\right)^2} \left(R_f - R_b\right) \quad (2\text{-}42)$$

dimana :

ω_{sync} = $2\pi n_s$ rps

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan metode penelitian yang akan dilakukan dalam mengevaluasi kinerja dari motor induksi satu fasa terhadap bentuk gelombang sinus termodifikasi. Metode penelitian yang digunakan mengacu pada rumusan masalah yang telah dibuat. Tahapan kajian yang disajikan pada penelitian ini meliputi :

3.1. Studi Literatur

Teori-teori yang terkait dalam penelitian ini dipelajari dalam studi literatur. Referensi yang dipelajari menyangkut pembahasan mengenai motor induksi satu fasa, inverter satu fasa dan harmonisa.

3.2. Spesifikasi Alat

Dalam melakukan penelitian dibutuhkan beberapa alat yang digunakan untuk pengambilan data diantaranya adalah :

1. Baterai kering 12 VDC
2. Inverter *modified sine wave* dengan tegangan *input* 12 VDC dan tegangan *output* 220 Volt dengan daya 1KW
3. Motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* dengan daya *input* 55 Watt, tegangan 220 Volt, frekuensi 50 Hz, dan memilki 2 pasang kutub.

Gambar 3.1 Diagram Blok Rangkaian

3.3. Cara Melakukan Penelitian

Dalam menyelesaikan penelitian ini dibutuhkan data primer maupun data sekunder. Data primer merupakan data yang didapatkan dari hasil pengujian

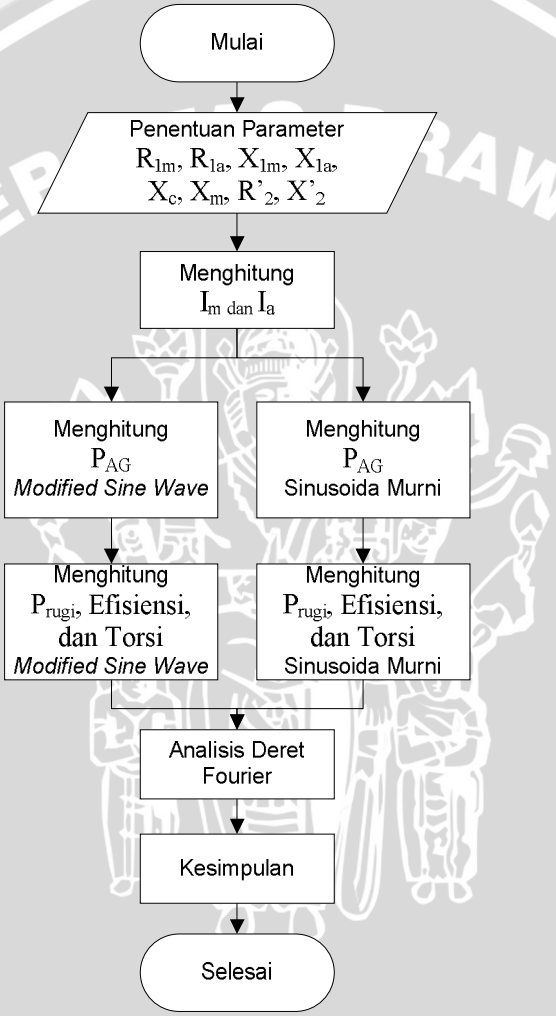
sedangkan data sekunder merupakan data yang diambil dari sumber referensi, jurnal, skripsi, maupun internet. Data sekunder yang diperlukan meliputi :

1. Prinsip dalam menentukan jenis motor induksi satu fasa
2. Prinsip dalam menentukan rangkaian ekivalen dari motor induksi satu fasa.
3. Prinsip dalam menentukan parameter-parameter motor induksi satu fasa yang ditunjukan oleh persamaan (2-20) sampai (2-31).
4. Prinsip penentuan kelas motor dalam menentukan parameter motor induks satu fasa
5. Prinsip dalam menentukan torsi, efisiensi serta rugi-rugi daya pada motor induksi satu fasa yan ditunjukkan oleh persamaan (2-40) sampai (2-42).
6. Karakteristik torsi-putaran serta efisiensi-putaran pada motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor*.
7. Prinsip Deret Fourier yang digunakan untuk mengubah bentuk gelombang sinus termodifikasi menjadi sebuah fungsi periodik menggunakan persamaan (2-1) sampai (2-4)

Adapun langkah-langkah dalam melakukan penelitian adalah sebagai berikut :

1. Penentuan parameter-parameter motor induksi R_{1m}, R_{1a}, X_{1m}, X_{1a}, X_c, X_m, R'_2, X'_2. Melalui tiga pengujian yaitu pengujian blok rotor, pengujian tanpa beban dan pengujian sumber DC pada motor induksi satu fasa.
2. Penyusunan rangkaian sesuai dengan diagram blok pada Gambar 3.1
3. Pengambilan data primer berupa arus *input*, tegangan *input*, daya *input* dan putaran rotor pada motor induksi satu fasa saat diberi sumber sinusoida.
4. Pengambilan data primer berupa arus *input*, tegangan *input*, daya *input* dan putaran rotor pada motor induksi satu fasa saat diberi sumber *modified sine wave.*
5. Perhitungan arus pada kumparan bantu dan kumparan utama.
6. Perhitungan besar daya celah udara pada motor induksi satu fasa saat menggunakan sumber sinusoida murni dan *modified sine wave.*

7. Perhitungan rugi-rugi daya, efisiensi, dan torsi pada motor induksi satu fasa saat menggunakan sumber sinusoida murni dan *modified sine wave*.
8. Menganalisis besar pengaruh bentuk gelombang *modified sine wave* terhadap kinerja motor induksi satu fasa melalui besar harmonisa gelombang *modified sine wave* menggunakan metode Deret Fourier.



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan dan Analisis

3.4. Menganalisis Data

Analisis dilakukan dengan melihat dampak dari bentuk gelombang sinus termodifikasi terhadap kinerja dari motor induksi satu fasa jenis *Permanent Split Capacitor* pada kipas angin. Analisis akan dilihat pada efisiensi, torsi dan rugi-rugi

daya pada motor induksi satu fasa pada keadaan *steady state*. Serta menganilisis harmonisa pada bentuk gelombang *modified sine wave* terhadap motor induksi satu fasa jenis *Permanent Split Capacitor* pada kipas angin.

3.5. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Setelah melakukan semua analisis dari hasil pengujian terhadap motor induksi satu fasa jenis *Permanent Split Capacitor*, maka tahap berikutnya adalah pengambilan kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan. Dan tahap akhir adalah saran dari penulis yang dimaksudkan untuk mengevaluasi dampak-dampak yang akan terjadi, sehingga dapat menjadi acuan dalam penentuan inverter maupun jenis beban pada *Solar Home System* (SHS).

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

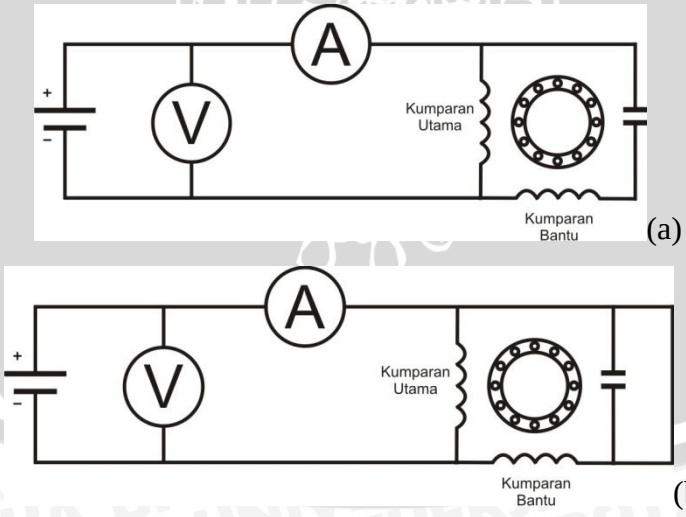
Pada bab ini akan dijelaskan hasil penelitian berupa perhitungan dan grafik. Perhitungan dilakukan berdasarkan metode yang telah dijelaskan pada bab II. Perhitungan yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* serta besar pengaruh harmonisa dari bentuk *modified sine wave* terhadap unjuk kerja motor induksi satu fasa jenis. Pengaruh pada motor induksi satu fasa yang ditinjau adalah berupa besar rugi-rugi daya, torsi, serta efisiensi.

4.1 Penentuan Parameter Pada Motor Induksi Satu Fasa

Penentuan parameter-parameter motor induksi satu fasa membutuhkan tiga pengujian, yaitu pengujian DC, pengujian blok rotor, dan pengujian tanpa beban.

1. Pengujian DC

   Dengan memberikan sumber DC pada stator dan diukur besar arus yang mengalir serta tegangan masukannya maka akan didapatkan besar dari resistansi DC. Untuk rangkaian pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Rangkaian Pengujian Sumber DC (a) Pengujian Tahanan Utama (b) Pengujian Tahanan Bantu

Hasil pengujian tahanan utama seperti yang terlihat pada lampiran 1, didapatkan besar tegangan V = 11,5 Volt, I = 0,03 A. Dikarenakan tahanan ini bekerja pada tegangan bolak-balik maka besar tahanan harus dikalikan faktor koreksi 1,3 (Wahyudinata, 2010). Dengan menggunakan persamaan (2-20) dan (2-21) didapatkan besar tahanan kumparan utama (R_{1m}) sebesar :

$$R_{DC1} = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} = \frac{11{,}5}{0{,}03} = 383{,}33\ \Omega$$

$$R_{1m} = 1{,}3R_{DC1}$$

$$R_{1m} = 498{,}33\ \Omega$$

Dan hasil pengujian untuk tahanan kumparan bantu didapatkan besar V = 11,5 Volt dan I = 0,05 A, dengan menggunakan persamaan (2-22) dan (2-23) dapatkan besar tahanan kumparan bantu (R_{1a}) sebesar :

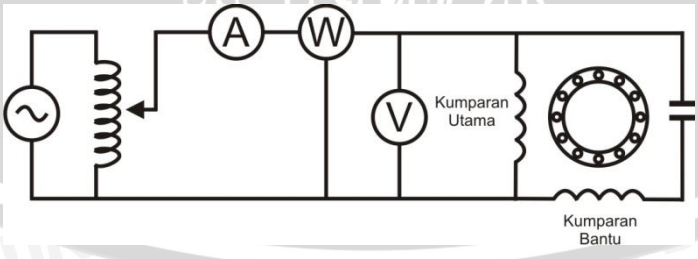
$$R_{DC2} = \frac{V_{DC2}}{I_{DC2}} = \frac{11{,}5}{0{,}05} = 230\ \Omega$$

$$R_{DC2} = \frac{R_{1a}R_{DC1}}{R_{DC1} + R_{1a}}$$

$$R_{1a} = 1{,}3\frac{R_{1m}R_{DC}}{R_{1m} - R_{DC}} = 747{,}5\ \Omega$$

2. Pengujian rotor ditahan

Pada pengujian rotor ditahan akan didapatkan parameter X_1, X_2', dan R_2'. Dengan rangkaian pengujian rotor ditahan seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Rangkaian Pengujian Rotor Ditahan

Dari pungujian blok rotor yang terlihat pada lampiran 1, akan diperoleh nilai P_{BR} = 46,4 Watt, V_{BR} = 182 Volt, dan I_{BR} = 0,26 A. Dan dengan

menggunakan persamaan (2-24) sampai (2-27) dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai dari Req, Xeq, dan Zeq sebagai berikut :

$$R_{eq} = \frac{P_{BR}}{{I_{BR}}^2} = \frac{46{,}4}{0{,}26^2} = 686{,}39\ \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} = \frac{182}{0{,}26} = 700\ \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{{Z_{eq}}^2 - {R_{eq}}^2}$$

$$X_{eq} = \sqrt{7686{,}39^2 - 700^2}$$

$$X_{eq} = 137{,}361\ \Omega$$

Kipas angin dengan motor jenis *permanently split capacitor* tergolong motor dengan torsi awal yang normal dan arus start yang kecil, sehingga kipas angin tergolong pada klasifikasi motor kelas B dengan perbandingan X_1 = 0,4 X_{BR} dan X_2' = 0,6 X_{BR}.

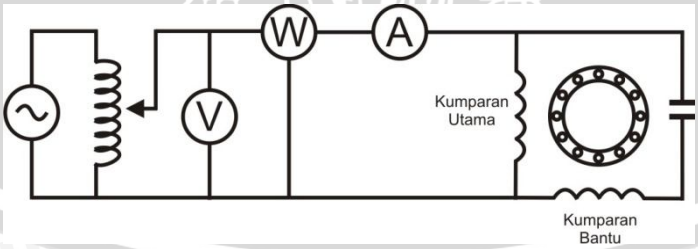
$$X_1 = 0{,}4X_{BR} = 54{,}944\ \Omega$$

$$X_2' = 0{,}6X_{BR} = 82{,}416\ \Omega$$

$$R_2' = R_{eq} - R_1 = 188{,}057\ \Omega$$

3. Pengujian tanpa beban (*No load*)

Pengujian tanpa beban akan mendapatkan parameter Xm. Rangkaian pengujian tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Rangkaian Pengujian Tanpa Beban

Dari pengukuran tanpa beban yang terlihat pada lampiran 1, didapatkan nilai dari V_{NL} = 220 Volt, I_{NL} = 0,23 A, dan P_{NL} = 38,5 Watt yang akan

dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2-28) sampai (2-31) adalah sebagai berikut :

$$P_{rot} = P_{NL} - {I_{NL}}^2 \left(R_1 + \frac{R_2'}{4}\right)$$

$$P_{rot} = 38{,}5 - 0{,}23^2 \left(498{,}33 + \frac{188{,}057}{4}\right)$$

$$P_{rot} = 9{,}65\ W$$

Impedansi dan resistansi beban nol :

$$Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \qquad R_{NL} = \frac{P_{NL}}{{I_{NL}}^2}$$

$$Z_{NL} = \frac{220}{0{,}23} \qquad R_{NL} = \frac{38{,}5}{0{,}23^2}$$

$$Z_{NL} = 956{,}522\ \Omega \qquad R_{NL} = 727{,}788\ \Omega$$

Reaktansi beban nol

$$X_{NL} = \sqrt{{Z_{NL}}^2 - {R_{NL}}^2}$$

$$X_{NL} = \sqrt{956{,}522^2 - 727{,}788^2}$$

$$X_{NL} = 620{,}692\ \Omega$$

Dan untuk Xm :

$$X_{NL} = X_1 + 0{,}5X_m + 0{,}5{X'}_2$$

$$X_m = 2X_{NL} - 2X_1 - {X'}_2 = 1049{,}078\ \Omega$$

Dari ketiga pengujian tersebut maka akan didapatkan parameter-parameter motor induksi satu fasa dengan merujuk pada Gambar 2.16 sebagai rangkaian ekivalen motor induksi satu fasa jenis *permanet split capacitor* adalah sebagai berikut :.

R_{1m} = 498,33 Ω

R_{1a} = 747,5 Ω

R_2’ = 188,057 Ω

X_1 = 54,944 Ω

X_2' = 82,416 Ω

X_m = 1049,078 Ω

X_c = 2123,142 Ω

4.2 Analisis Rugi-rugi Pada Motor Induksi Satu Fasa

Melalui teori medan putar ganda (*double revolving-field theory*), penentuan rugi-rugi pada motor induksi satu fasa dilakukan dengan mendefinisikan komponen-komponen pada medan magnet maju dan medan magnet mundur.

4.2.1. Analisis Daya Celah Udara (*Air-Gap Power*)

Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan daya, maka dibuat definisi Zf dan Zb, dimana Zf adalah resistansi ekivalen tunggal untuk semua impedansi pada medan magnet maju dan Zb adalah resistansi ekivalen tunggal untuk semua impedansi pada medan magnet mundur, yang telah didefinisikan melalui persamaan (2-8) dan (2-9).

Daya celah udara (P_{AG}) pada motor induksi satu fasa merupakan daya yang dikonsumsi resistansi pada rotor. Sehingga daya celah udara pada motor induksi satu fasa dapat dihitung dengan menghitung daya pada resistansi maju dan daya pada resistansi mundur pada sisi rotor yang saling mengurangi. Persamaan untuk mendapatkan besar daya celah udara pada medan maju dan medan mundur pada *permanent split capacitor* dapat menggunakan persamaan (2-32) dan (2-33). Sehingga diperlukan besarnya nilai arus pada kumparan utama (Im) dan arus pada kumparan bantu (Ia) dengan nilai a yaitu rasio belitan kumparan bantu dengan kumparan utama sebesar 1,38.

Dari hasil pengujian seperti yang terlihat pada lampiran 2 didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Motor Induksi Satu Fasa

	Sumber *Modified Sine Wave*	**Sumber Sinusoida Murni**
Daya Input	46 Watt	45,5 Watt
Tegangan Input	192 Volt	192 Volt
Arus Input	0,236 Ampere	0,23 Ampere
Putaran Rotor	979 rpm	1040 rpm

1. Sumber Inverter *Modified Sine Wave*

Kecepatan sinkron :

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120.50}{4} = 1500\ rpm$$

Slip :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$$s = \frac{1500 - 979}{1500}$$

$$s = 0{,}347$$

Dan :

$$X_c = -j\frac{1}{2\pi fC} = -j\frac{1}{2.3{,}14.50.1{,}5.10^{-6}} = 2123{,}143\ \Omega$$

$$Z_a = R_{1a} + X_c = 747{,}5 - j2123{,}143\ \Omega$$

Sehingga impedansi ekivalen untuk medan maju dan medan mundur sebesar :

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{188{,}057}{0{,}347} + j82{,}416\right)(j1049{,}078)}{\left(\frac{188{,}057}{0{,}347} + j82{,}416\right) + (j1049{,}078)}$$

$$Z_f = R_f + jX_f = 378{,}71 + j257{,}63\ \Omega$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\left(\frac{188{,}057}{2 - 0{,}347} + j82{,}416\right)(j1049{,}078)}{\left(\frac{188{,}057}{2 - 0{,}347} + j82{,}416\right) + (j1049{,}078)}$$

$$Z_b = R_b + jX_b = 96{,}84 + j86{,}15\ \Omega$$

Menurut persamaan 2-13 sampai 2-16 didapatkan nilai impedansi sebagai berikut :

$$Z_{11} = R_{1m} + Z_f + Z_b + jX_1$$
$$Z_{11} = 498{,}33 + 378{,}71 + j257{,}63 + 96{,}84 + j86{,}15 + j54{,}944$$
$$Z_{11} = 973{,}88 + j398{,}73\ \Omega$$
$$Z_{11} = 1052{,}35 \angle 22{,}27°\ \Omega$$

$$Z_{12} = -ja(Z_f - Z_b)$$
$$Z_{12} = -j1{,}38(378{,}71 + j257{,}63 - 96{,}84 - j86{,}15)$$
$$Z_{12} = 236{,}64 - j388{,}99\ \Omega$$
$$Z_{12} = 455{,}316 \angle -58{,}68°\ \Omega$$

$$Z_{21} = ja(Z_f - Z_b)$$
$$Z_{21} = j1{,}38(378{,}71 + j257{,}63 - 96{,}84 - j86{,}15)$$
$$Z_{21} = -236{,}64 + j388{,}99\ \Omega$$
$$Z_{21} = 455{,}316 \angle -58{,}68°\ \Omega$$

$$Z_{22} = Z_a + a^2(Z_f + Z_b + jX_1)$$
$$Z_{22} = 747{,}5 - j2123{,}143 + 1{,}38^2(378{,}71 + j257{,}63 + 96{,}84 + j86{,}15 + j54{,}944$$
$$Z_{22} = 1653{,}14 - j1363{,}8\ \Omega$$
$$Z_{22} = 2143{,}09 \angle -39{,}52°\ \Omega$$

Sehingga besar arus pada kumparan utama (Im) dan kumparan bantu (Ia) :

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{V}(Z_{22} - Z_{12})}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$
$$\bar{I}_m = \frac{192(1653{,}14 - j1363{,}8 - 236{,}64 + j388{,}99)}{1052{,}35 \angle 22{,}27°.\ 2143{,}09 \angle -39{,}52° - 455{,}316 \angle -58{,}68°.\ 455{,}316 \angle -58{,}68°}$$
$$\bar{I}_m = 0{,}132 - j0{,}0546\ A$$
$$\bar{I}_m = 0{,}143 \angle -22{,}367°\ A$$

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

$$\bar{I}_a = \frac{192(973{,}88 + j398{,}73 + 236{,}64 - j388{,}99)}{1052{,}35\angle 22{,}27°.\, 2143{,}09\angle -39{,}52° - 455{,}316\angle -58{,}68°.\, 455{,}316\angle -58{,}68°}$$

$$\bar{I}_a = 0{,}0985 - j0{,}0221\ A$$

$$\bar{I}_a = 0{,}101\angle 12{,}63°A$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_a$$

$$\bar{I}_1 = 0{,}143\angle -22{,}367° + 0{,}101\angle 12{,}63°\ A$$

$$\bar{I}_1 = 0{,}2335\ \angle -8°A$$

Jadi besar dari daya celah udara dengan sumber inverter modified sine wave sebesar :

$$P_{AG,f} = (0{,}143^2 + 1{,}38^2.\, 0{,}101^2)0{,}5.378{,}71 + 2.1{,}38.0{,}143.0{,}101 .378{,}71.\sin(12{,}63° + 22{,}367°)$$

$$P_{AG,f} = 11{,}924\ \text{W}$$

$$P_{AG,b} = (0{,}143^2 + 1{,}38^2.\, 0{,}101^2)0{,}5.96{,}84 + 2.1{,}38.0{,}143.0{,}101 .96{,}84.\sin(12{,}63° + 22{,}367°)$$

$$P_{AG,b} = 3{,}049\ \text{W}$$

$$P_{AG} = P_{AG,f} - P_{AG,b}$$

$$P_{AG} = 11{,}924 - 3{,}049$$

$$P_{AG} = 8{,}875\ W$$

2. Sumber Sinusoida Murni

Nilai slip untuk sumber sinusoida murni :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$$s = \frac{1500 - 1040}{1500}$$

$$s = 0{,}306$$

Memiliki impedansi ekivalen untuk medan maju dan medan mundur sebesar :

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{188{,}057}{0{,}306} + j82{,}416\right)(j1049{,}078)}{\left(\frac{188{,}057}{0{,}306} + j82{,}416\right) + (j1049{,}078)}$$

$$Z_f = R_f + jX_f = 407{,}466 + j297{,}245\ \Omega$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\left(\frac{188{,}057}{2 - 0{,}306} + j82{,}416\right)(j1049{,}078)}{\left(\frac{188{,}057}{2 - 0{,}306} + j82{,}416\right) + (j1049{,}078)}$$

$$Z_b = R_b + jX_b = 94{,}55 + j85{,}69\ \Omega$$

Menurut persamaan 2-13 sampai 2-16 didapatkan nilai impedansi sebagai berikut :

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

$$Z_{11} = 498{,}33 + 407{,}466 + j297{,}245 + 94{,}55 + j85{,}69 + j54{,}944$$

$$Z_{11} = 1000{,}35 + j437{,}88\ \Omega$$

$$Z_{11} = 1091{,}\angle 23{,}64°\ \Omega$$

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

$$Z_{12} = -j1{,}38(407{,}466 + j297{,}245 - 94{,}55 - j85{,}69)$$

$$Z_{12} = 291{,}94 - j431{,}815\ \Omega$$

$$Z_{12} = 521{,}242\angle -55{,}93°\ \Omega$$

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

$$Z_{21} = j1{,}38(407{,}466 + j297{,}245 - 94{,}55 - j85{,}69)$$

$$Z_{21} = -291{,}9j + 431{,}815\ \Omega$$

$$Z_{21} = 521{,}242\angle -55{,}93°\ \Omega$$

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

$$Z_{22} = 747{,}5 - j2123{,}143 + 1{,}38^2(407{,}466 + j297{,}245 + 94{,}55 + j85{,}69 + j54{,}944)$$

$$Z_{22} = 1703{,}55 - j1289{,}23\ \Omega$$

$$Z_{22} = 2136{,}404\angle -37{,}12°\ \Omega$$

Sehingga besar arus pada kumparan utama (Im) dan kumparan bantu (Ia) :

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

$$\bar{I}_m = \frac{192(1703{,}55 - j1289{,}23 \; - 291{,}94 - j431{,}815)}{1091,\angle 23{,}64°.\, 2136{,}404 \angle -37{,}12° - 521{,}242 \angle -55{,}93°.\, 521{,}242 \angle -55{,}93°}$$

$$\bar{I}_m = 0{,}1211 - j0{,}0545\; A$$

$$\bar{I}_m = 0{,}1328 \angle -24{,}26° A$$

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

$$\bar{I}_a = \frac{192(1000{,}35 + j437{,}88 + 291{,}9j - 431{,}815)}{1091,\angle 23{,}64°.\, 2136{,}404 \angle -37{,}12° - 521{,}242 \angle -55{,}93°.\, 521{,}242 \angle -55{,}93°}$$

$$\bar{I}_a = 0{,}1031 - j0{,}0131\; A$$

$$\bar{I}_a = 0{,}1039 \angle 7{,}28° A$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_a$$

$$\bar{I}_1 = 0{,}133 \angle -24{,}26° + 0{,}1039 \angle 7{,}28°\; A$$

$$\bar{I}_1 = 0{,}227 \; \angle -10{,}46° A$$

Sehingga besar dari daya celah udara untuk sumber sinusoida murni adalah sebesar :

$$P_{AG,f} = (0{,}133^2 + 1{,}38^2.\, 0{,}104^2)0{,}5.407{,}466 + 2.1{,}38.0{,}133.0{,}104 .407{,}466 .\sin(7{,}28° + 24{,}26°)$$

$$P_{AG,f} = 11{,}842 \text{ W}$$

$$P_{AG,b} = (0{,}133^2 + 1{,}38^2.\, 0{,}104^2)0{,}5.94{,}55 + 2.1{,}38.0{,}133.0{,}104 .94{,}55 .\sin(7{,}28° + 24{,}26°)$$

$$P_{AG,b} = 2{,}748 \text{ W}$$

$$P_{AG} = P_{AG,f} - P_{AG,b}$$

$$P_{AG} = 11{,}842 - 2{,}748$$

$$P_{AG} = 9{,}094\; W$$

Perbedaan antara hasil pengujian dengan hasil perhitungan pada besar arus masukkan dapat disebabkan karena kurang akuratnya alat ukur yang digunakan, karena alat ukur yang digunakan merupakan alat ukur analog.

Besar daya celah udara pada saat diberi sumber inverter modified sine wave adalah 8,875 W dan untuk sumber sinusoida murni sebesar 9,094 W. Besar kecilnya daya celah udara ini dipengaruhi oleh besar slip motor. Hasil perhitungan dari data hasil pengujian di atas, dapat diketahui bahwa dengan besar tegangan serta arus yang sama menghasilkan besar putaran rotor yang berbeda antara sumber *modified sine wave* dengan sumber sinusoida murni. Besar putaran rotor ini akan mempengaruhi besarnya slip sehingga semakin besar slip akan memperkecil besar daya celah udara. Jadi dengan menurunnya putaran motor induksi satu fasa (kipas angin) ketika diberi sumber inverte modified sine wave mengakibatkan menurunnya besar daya celah udara daripada menggunakan sumber sinusoida murni.

4.2.2. Analisis Rugi Tembaga (*Copper Losses*)

Rugi-rugi tembaga pada motor induksi merupakan rugi-rugi variabel, yaitu rugi-rugi yang berubah-ubah sesuai dengan beban dan sumber tegangan. Rugi-rugi tembaga terdiri dari rugi tembaga pada stator dan rugi tembaga pada rotor. Dengan mengacu pada persamaan (2-35) hingga (2-38) maka akan diperoleh besar dari rugi tembaga saat diberi sumber tegangan inverter modified sine wave dan sumber PLN.

Pada sumber inverter *modified sine wave* :

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

$$P_{CL} = {I_{1m}}^2 . R_{1m} + {I_{1a}}^2 . R_{1a} + s . P_{AG,f} + (2 - s) . P_{AG,b}$$

$$P_{CL} = 0{,}143^2 . 498{,}33 + 0{,}101^2 . 747{,}5 + 0{,}35 . 11{,}924 + (2 - 0{,}35) . 3{,}049$$

$$P_{CL} = 27{,}071\ W$$

Dan untuk sumber sinusoida murni :

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

$$P_{CL} = {I_{1m}}^2 . R_{1m} + {I_{1a}}^2 . R_{1a} + s . P_{AG,f} + (2 - s) . P_{AG,b}$$

$$P_{CL} = 0{,}133^2 . 498{,}33 + 0{,}104^2 . 747{,}5 + 0{,}306 . 11{,}842 + (2 - 0{,}306) . 2{,}748$$

$$P_{CL} = 25{,}145\ W$$

Besar rugi tembaga pada saat diberi sumber inverter *modified sine wave* adalah 27,071 W dan untuk sumber sinusoida murni sebesar 25,145 W. Pada sumber inverter *modified sine wave* mengalir arus yang lebih besar dari pada sumber sinusoida murni sehingga mengakibatkan rugi tembaga yang lebih besar.

Akibat rugi daya yang lebih besar ini, maka energi yang dikonsumsi dari suatu peralatan akan semakin besar dan energi yang hilang (berupa panas) juga lebih besar. Sehingga daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan motor induksi satu fasa, akan lebih besar saat menggunakan sumber inverter *modified sine wave* dari pada sumber sinusoida murni.

Selain itu kenaikan temperatur yang melebih batas normal akibat rugi-rugi ini akan berakibat pada daya tahan konduktor dan motor menurun. Sehingga semakin besar rugi-rugi menyebabkan semakin pendek umur dari piranti.

4.3 Analisis Efisiensi Pada Motor Induksi Satu Fasa

Efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukkan yang bisa dijadikan tolak ukur kualitas dari sistem. Karena semakin besar efisiensi akan semakin bagus sistem tersebut bekerja. 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 :

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{rugi}}{P_{in}} x100\%$$

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

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

Dan untuk sumber sinusoida murni :

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{rugi}}{P_{in}} x100\%$$

$$\eta = \frac{45{,}5 - 34{,}79}{45} x100\%$$

$$\eta = 23{,}52\ \%$$

Pada data sheet motor induksi satu fasa pada kipas angin, efisiensi saat beban penuh mencapai ± 50% seperti yang terlihat pada lampiran 3. Dan akan terus menurun apabila beban motor juga menurun. Dari *nameplate* kipas angin pada lampiran 3 terlihat bahwa tegangan nominal kipas angin sebesar 220 Volt. Dengan adanya penurunan tegangan ketika diberi sumber *modified sine wave*, menyebabkan motor induksi satu fasa (kipas angin) tidak dioperasikan pada tegangan nominalnya. Dengan menurunnya tegangan masukkan akan mengakibatkan menurunnya daya, arus, serta putaran motor dari keadaan nominal. Hal ini yang mengakibatkan efisiensi motor induksi menurun. Sehingga dalam pengujian menggunakan sumber sinusoida murni dilakukan pada tegangan yang sama dengan sumber *modified sine wave* yaitu sebesar 192 Volt.

Selain itu menurut karakteristik efisiensi-putaran pada motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* terjadi penurunan efisiensi sebesar 40% dari efisiensi maksimum saat putaran motor mengalamin penurunan 30% dari putaran maksimum. (Miller *et al*, 2007)

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. Meningkatnya temperatur pada motor induksi akan berakibat menurunnya kinerja dari motor tersebut, karena bekerja pada temperatur di atas keadaan normal.

Efisiensi motor induksi satu fasa (kipas angin) jenis *permanent split capacitor* saat diberi sumber sinusoida murni dengan tegangan nominalnya yaitu 220 Volt, melalui perhitungan menghasilkan efisiensi sebesar 31,47 % dengan putaran rotor 1163 rpm dan daya masukan 56 W.

4.4 Analisis Torsi Pada Motor Induksi Satu Fasa

Torsi merupakan gambaran dari besar kecilnya beban. Semakin besar beban maka torsi yang dibutuhkan akan semakin besar. Menurut persamaan (2-42) besar torsi sebanding dengan besarnya daya celah udara sedangkan besar daya celah udara sangat dipengaruhi oleh putaran rotor sehingga selain arus, putaran rotor pun akan cukup berpengaruh pada besar kecilnya torsi motor saat berputar.

Dari hasil pengukuran berbeban dan tanpa beban, didapatkan besar arus masukkan serta putaran rotor seperti yang terlihat pada Tabel 4.2. Dengan persamaan (2-42) akan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai torsi, dan contoh perhitungan torsi adalah sebagai berikut :

sumber inverter modified sine wave :

$$T = \frac{8{,}87}{157} \quad , \quad dimana\ \omega_{sync} = 157\ rps$$

$$T = 56{,}53\ .\ 10^{-3}\ Nm$$

sumber sinusoida murni :

$$T = \frac{9{,}09}{157} \quad , \quad dimana\ \omega_{sync} = 157\ rps$$

$$T = 57{,}92\ .\ 10^{-3}\ Nm$$

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Putaran dan Arus Masukkan

	Sumber *Modified Sine Wave*	**Sumber Sinusoida Murni**
Arus (A)	0,24	0,24
Putaran (rpm)	979	1040

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Torsi

	Sumber *Modified Sine Wave*	**Sumber Sinusoida Murni**
Torsi (Nm)	$56{,}53\ .\ 10^{-3}$	$57{,}92\ .\ 10^{-3}$

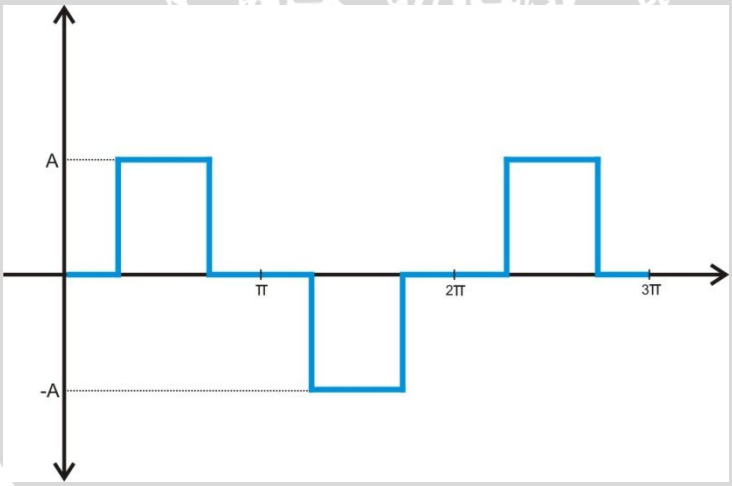
Dari karaktersistik torsi-putaran, semakin besar torsi akan memperbesar putaran motor sampai pada torsi maksimumnya. Dan jika putaran motor terus meningkat maka akan mengakibatkan menurunnya torsi motor. (Miller *et al*, 2007)

Torsi yang dihasilkan oleh sumber *modified sine wave* 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.

Dari hasil peneilitian didapatkan 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 kecil saat 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.

4.5 Analisis Harmonisa Bentuk *Modified Sine Wave*

Inverter modified sine wave menghasilkan gelombang kotak yang memilki interval pada saat nol, yang terlihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Sinus Termodifikasi

Bentuk gelombang pada Gambar 4.4 dapat dianalisis menggunakan metode deret Fourier yang menghasilkan sebuah persamaan jumah seri harmonisa frekuensi dasar. Penurunan metode Fourier adalah sebagai berikut :

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

Dari persamaan gelombang tersebut nilai A merupakan Vp pada *modified sine* wave, selanjutnya :

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{1/8T}^{3/8T} A\ dt + \frac{1}{T}\int_{5/8T}^{7/8T} -A\ dt$$

$$a_0 = \frac{At}{T}\Big|_{1/8T}^{3/8T} - \frac{At}{T}\Big|_{5/8T}^{7/8T}$$

$$a_0 = -\frac{A}{8}$$

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

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{1/8T}^{3/8T} A\cos(n\omega t)\,dt + \frac{2}{T}\int_{5/8T}^{7/8T} -A\cos(n\omega t)\,dt$$

$$a_n = \frac{2A}{n\omega T}\sin(n\omega t)\Big|_{1/8T}^{3/8T} - \frac{2A}{n\omega T}\sin(n\omega t)\Big|_{5/8T}^{7/8T}$$

$$a_n = \frac{A}{n\pi}\left(\sin(n\pi\,3/4) - \sin(n\pi\,1/4) - \sin(n\pi\,7/4) + \sin(n\pi\,5/4)\right)$$

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

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{1/8T}^{3/8T} A\sin(n\omega t)\,dt + \frac{2}{T}\int_{5/8T}^{7/8T} -A\sin(n\omega t)\,dt$$

$$b_n = \frac{2A}{n\omega T}\cos(n\omega t)\Big|_{3/8\,T}^{1/8\,T} - \frac{2A}{n\omega T}\cos(n\omega t)\Big|_{7/8\,T}^{5/8\,T}$$

$$b_n = \frac{A}{n\pi}\left(\cos(n\pi\,{}^1/_4) - \cos(n\pi\,{}^3/_4) - \cos\left(n\pi\,{}^5/_4\right) + \cos(n\pi\,{}^7/_4)\right)$$

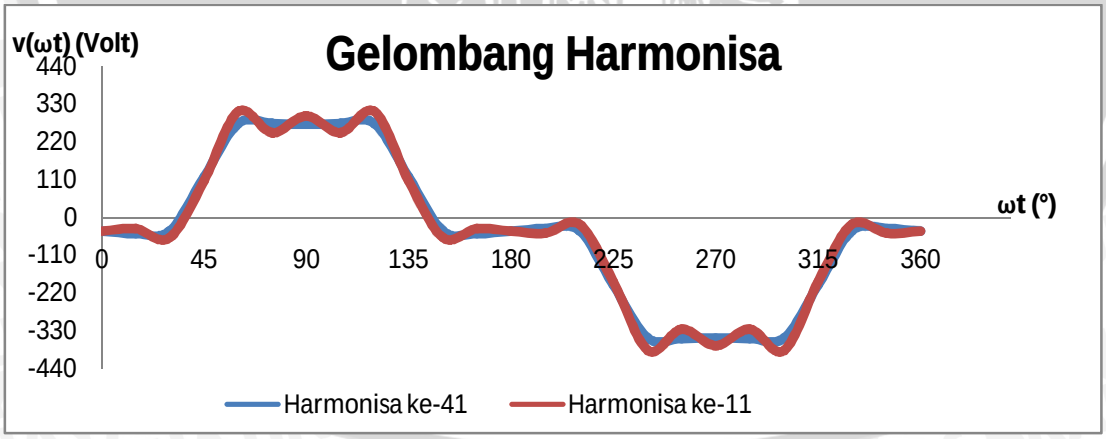
dimana, $\omega = 2\pi/T$

Sehingga tegangan harmonisa ke-n untuk *modified sine wave* adalah sebagai berikut :

$$v(\omega t) = -\frac{A}{8}$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{A}{n\pi}\left(\sin\left(n\pi\,{}^3/_4\right) - \sin\left(n\pi\,{}^1/_4\right) - \sin\left(n\pi\,{}^7/_4\right) + \sin\left(n\pi\,{}^5/_4\right)\cos(n\omega t)\right)\right.$$

$$\left.+\frac{A}{n\pi}\left(\cos\left(n\pi\,{}^1/_4\right) - \cos\left(n\pi\,{}^3/_4\right) - \cos\left(n\pi\,{}^5/_4\right) + \cos\left(n\pi\,{}^7/_4\right)\right)\sin(n\omega t)\right)$$



Gambar 4.5 Gelombang Harmonisa ke-n dari *Modified Sine Wave*

Dengan persamaan tegangan didapatkan bentuk gelombang *modified sine wave* hingga harmonisa ke-41 dan harmonisa ke-11 seperti yang terlihat pada Gambar 4.5.

Kemudian dari hasil pengukuran didapatkan arus maksimum sebesar 0,3 A. Dengan mengacu pada persamaan tegangan di atas maka persamaan arus dari hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

$$i(\omega t) = -\frac{3}{80}$$

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

Untuk mendapatkan nilai RMS hingga harmonisa ke-23 adalah sebagai berikut:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(\omega t)dt}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(-\frac{3}{80}+\sum_{n=1}^{\infty}K_n\sin(n\omega t)\right)^2 dt}$$

$${I_{rms}}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left(-\frac{3}{80}+\sum_{n=1}^{\infty}K_n\sin(n\omega t)\right)^2 dt$$

$${I_{rms}}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left(-\frac{3}{80}\right)^2 dt + ..bernilai\ nol.. + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{T}\int_0^T {K_n}^2 sin^2(n\omega t)\,dt$$

$${I_{rms}}^2 = {I_0}^2 + \sum_{n=1}^{\infty}{I_{nrms}}^2$$

Jadi persamaan arus bentuk gelombang *modified sine wave* adalah sebagai berikut :

$$i(t) = -\frac{3}{80} + 0{,}2701\sin(\omega t) - 0{,}09\sin(3\omega t) - 0{,}054\sin(5\omega t)$$

$$+0{,}0386\sin(7\omega t) + 0{,}03\sin(9\omega t) - 0{,}0246\sin(11\omega t)$$

$$-0{,}0208\sin(13\omega t)$$

Dengan memasukkan nilai n sehingga didapatkan besar arus efektif pada setiap harmonisa ke-n pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Nilai I_{rms} dari Harmonisa ke-n

Harmonisa ke-n	I_{rms} (A)
1	0,1946
3	0,2048
5	0,2083
7	0,2101
9	0,2112
11	0,2119
13	0,2124
15	0,2128
17	0,2131
19	0,2133
21	0,2135
23	0,2137

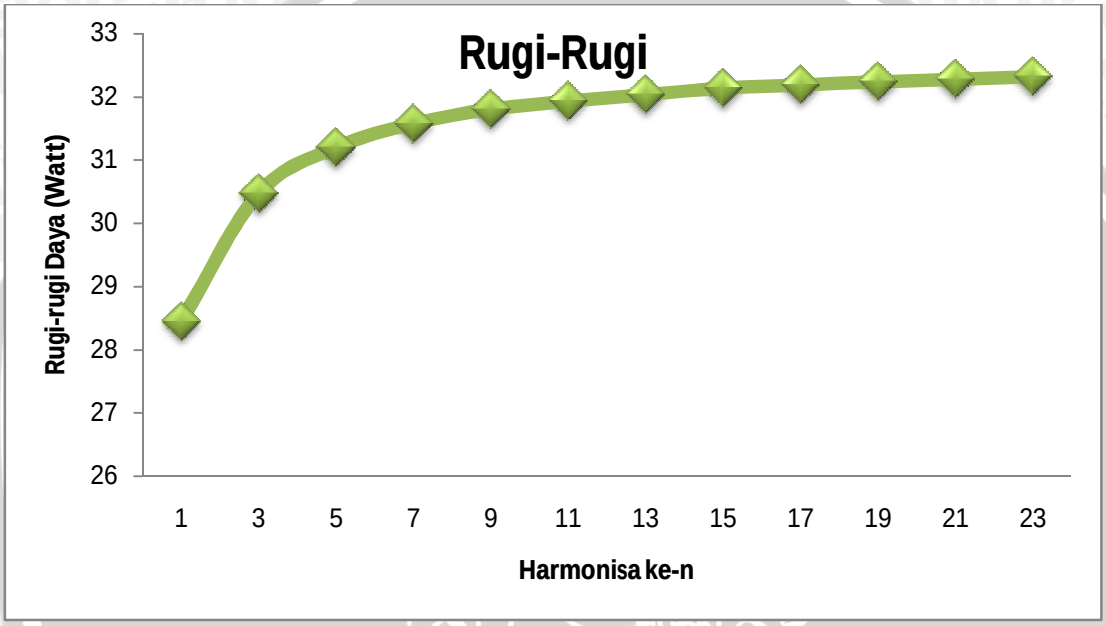
Melalui pendekatan pada bentuk gelombang harmonisa, dari Tabel 4.4 dilakukan perhitungan untuk mendapatkan besar rugi-rugi tiap harmonisa ke-n. Melalui data hasil pengukuran menggunakan sumber inverter *modified sinewave* digunakan nilai slip sebesar 0,35. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.5 Rugi-rugi dari Harmonisa ke-n

Harmonisa ke-n	Rugi-Rugi (Watt)
1	28,4501
3	30,4758
5	31,1992
7	31,5783
9	31,8073
11	31,935
13	32,0375
15	32,1402
17	32,1916
19	32,2431
21	32,2817
23	32,3204

Perbedaan hasil perhitungan dengan hasil pengukuran dapat disebabkan karena kesalahan pada alat ukur, karena alat ukur yang digunakan merupakan alat ukur

analog. Selain itu, motor yang digunakan merupakan motor pada kipas angin yang perlu dilakukan pembongkaran pada belitan stator saat menentukan rasio belitan antara kumparan bantu dengan kumparan utama. Sehingga penentuan rasio dilakukan dengan cara mencari rasio belitan rata-rata pada beberapa motor kipas angin yang telah ada. Dari Tabel 4.5 akan didapatkan grafik dari rugi-rugi fungsi harmonisa ke-n dan grafik torsi fungsi harmonisa ke-n sebagai berikut :



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Rugi-Rugi Daya Terhadap Harmonisa ke-n

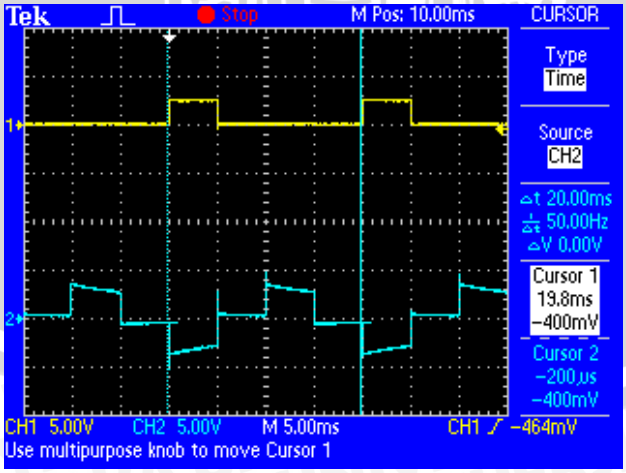
Dalam perhitungan ini diasumsikan bahwa putaran rotor tetap, maka slip yang digunakan pada perhitungan tidak berubah. Sehingga harmonisa ke-1 pada Gambar 4.6 merupakan gelombang fundamental berbentuk sinusoida saat putaran rotor sama dengan gelombang *modified sine wave*. Karena itu besar rugi-rugi daya pada harmonisa ke-1 yaitu gelombang fundamental berbeda dari hasil perhitungan rugi-rugi daya menggunakan sumber sinusoida murni.

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 pada putaran rotor yang sama. Dari Gambar 4.6 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 non-sinusoida. 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*.

Selain itu, bentuk gelombang *modified sine wave* merupakan bentuk gelombang sinusoida dengan harmonisa lebih dari 41 sehingga besar rugi-rugi daya saat menggunakan sumber *modified sine wave* akan lebih besar dari rugi-rugi daya pada harmonisa ke-23 seperti pada Gambar 4.6. Dengan harmonisa yang besar akan menyebabkan penambahan kerugian pada belitan rotor, stator, serta laminasi stator dan rotor. Besarnya rugi-rugi daya berupa panas diakibatkan oleh frekuensi dari tegangan sumber yang meningkat akibat harmonisa-harmonisa pada gelombang fundamental-nya. Jadi *modified sinewave* akan menghasilkan rugi-rugi yang besar dengan harmonisa yang besar pula.

Dapat dilihat pada Gambar 4.5 untuk harmonisa ke-41 bentuk gelombang belum menyerupai bentuk *modified sinewave* yang dapat dilihat pada gambar osiloskop dibawah ini. Sehingga dapat diperkirakan bentuk *modified sinewave* ini merupakan bentuk gelombang harmonisa ke-100.



Gambar 4.7 Tampilan Osiloskop *Modified Sinewave*

Dalam *Solar Home System* ini penggunaan inverter *modified sine wave* sangat berpengaruh pada beban motor induksi satu fasa pada kipas angin. Pengaruh bentuk

gelombang *modified sine wave* ini tergantung dari jenis motor induksi satu fasa, karena tidak semua jenis motor induksi yang diaplikasikan pada peralatan rumah tangga dapat di operasikan dengan menggunakan sumber inverter *modified sine wave*. Meskipun tergolong murah, *solar home system* dengan menggunakan inverter *modified sine wave* tidak cocok digunakan pada beban non-linier karena akan mengakibatkan menurunnya efisiensi motor, meningkatnya rugi-rugi daya motor, serta menurunnya putaran motor.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan yang terjadi akibat penggunaan sumber inverter *modifiied sine wave* pada beban motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* dalam *solar home system* adalah sebagai berikut:

1. Perubahan rugi-rugi daya pada motor induksi satu fasa jenis *permanent split capacitor* pada kipas angin, mengalami kenaikan rugi-rugi daya saat diberi sumber inverter *modified sine wave* dengan nilai sebesar 36,72 Watt. Dibandingkan sumber sinusoida murni dengan besar rugi-rugi daya sebesar 34,79 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 $57{,}92.\ 10^{-3}$ 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 23,52 % menjadi 20,17%.

5.2 Saran

Dari hasil penenlitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam menentukkan jenis inverter yang dapat disesuaikan dengan jenis beban yang digunakan pada *solar home system*. Dan disarankan agar :

1. Penggunaan inverter *modified sine wave* pada *sistem photovoltaic* sebaiknya digunakan pada beban-beban linier seperti lampu.

2. Menggunakan filter, baik filter aktif maupun filter pasif jika tetap menggunakan inverter *modified sinewave*, agar bentuk gelombang dapat menyerupai bentuk gelombang fundamental, sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi.

DAFTAR PUSTAKA

.....,2010,http://www.simplecircuitsandprojects.com,.....,.....

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

Chapman, Stephen J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals Forth Edition.* New York: Mcgraw-Hill.

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)

John,.....,http://www.m0ukd.com,.....,....

Miller, Tje., Malcolm Mcgilp, Mircea, P., Calum, C. & Claus, B. R. 2007. *Effect of MMF Harmonics on Single-Phase Induction Motor Performance*. SPEED Laboratory. University of Glasgow. Glasgow (UK).

Sankaran, C. 2002. *Power Quality*. Boca Raton: CRC Press LLC.

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

Sudirham, Sudaryatno. 2011. *Open Course: Analisis Harmonisa*. TGJ LIPI. http://penulis.buku-e.lipi.go.id/suda003/. (diakses 12 Oktober 2012)

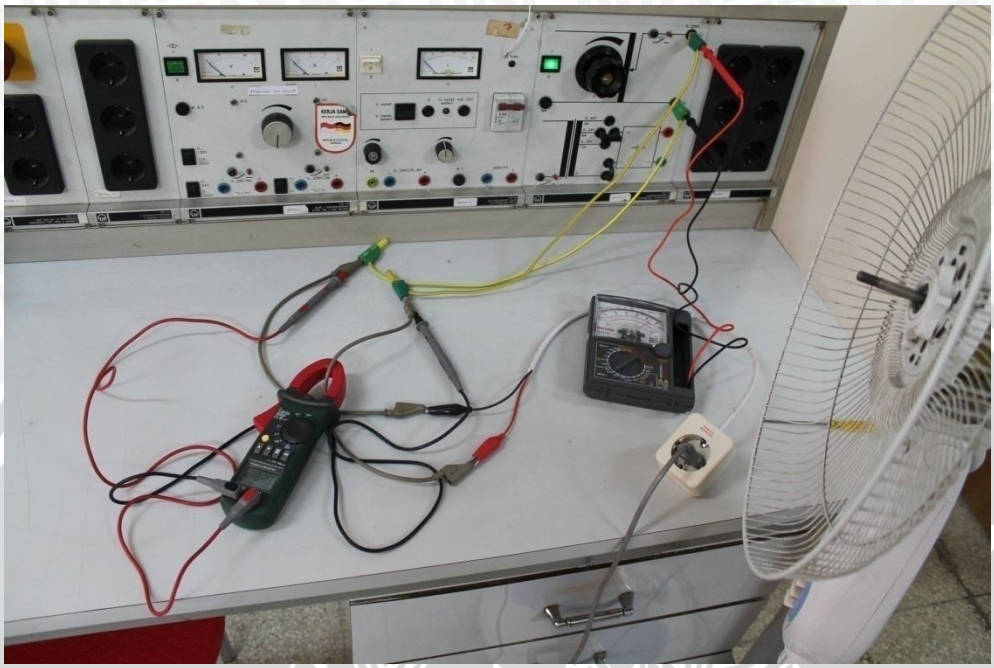
Wahyudinata. 2010. *Analisis Performansi Motor Induksi Kapasitor Permanen Satu Phasa Dengan Belitan Bantu Dan Belitan Utama Berdasarkan Teori Medan Fluksi Silang Dan Teori Medan Fluksi Ganda*. Skripsi dipublikasikan. Medan: Universitas Sumatera Utara.

Zuhal. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: ITB.

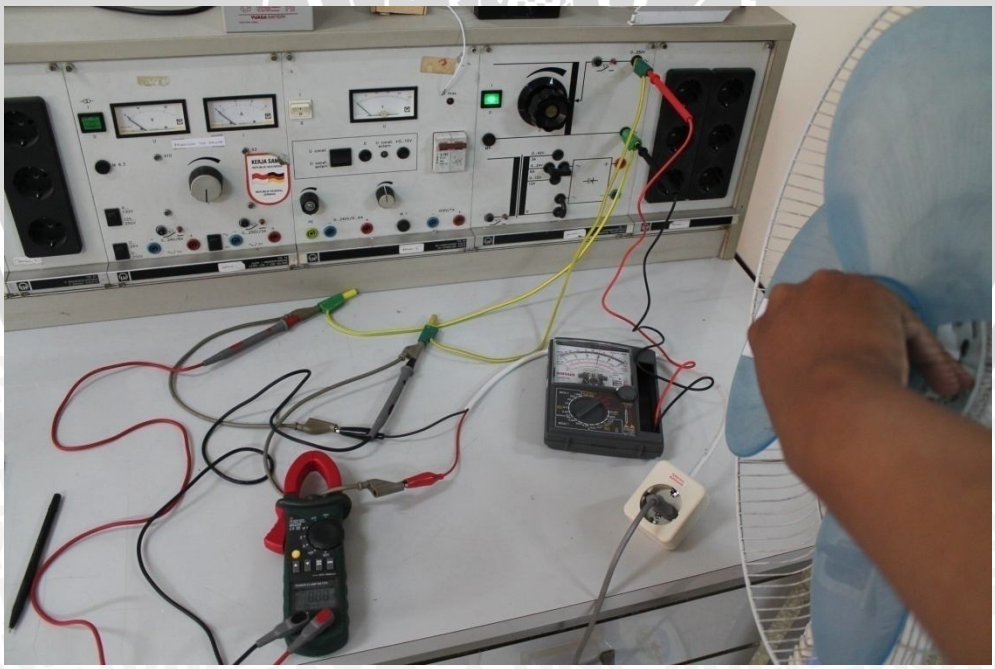
Lampiran 1

Lampiran 1. Pengujian Parameter Motor Induksi Satu Fasa

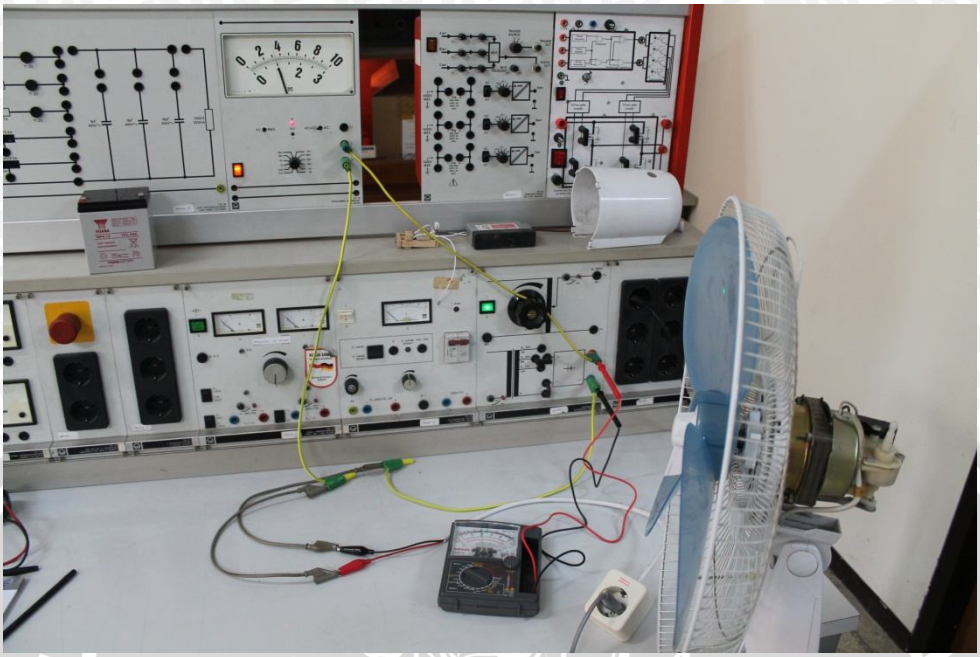
1. Pengujian Tanpa Beban (*No Load*)



2. Pengujian Rotor Ditahan (*Block Rotor*)



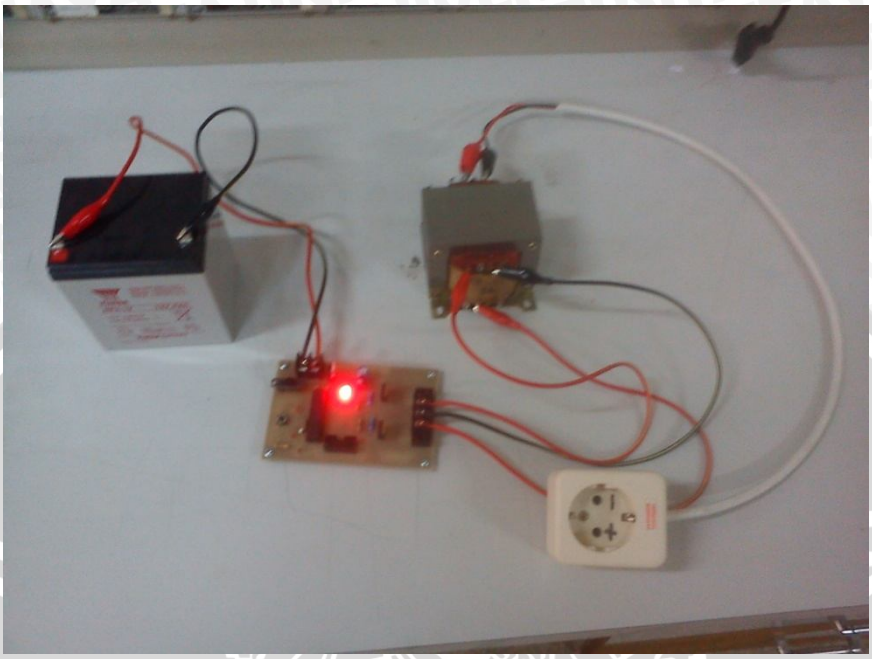
3. Pengujian Sumber DC



Lampiran 2

Lampiran 2. Foto Alat

1. Inverter Modified Sine Wave

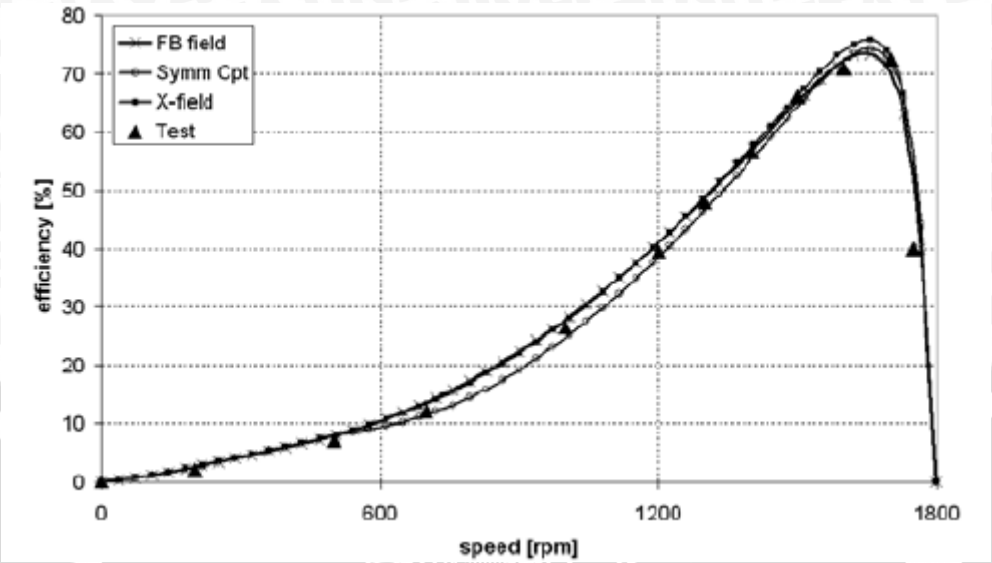


2. Motor Induksi Satu Fasa jenis PSC

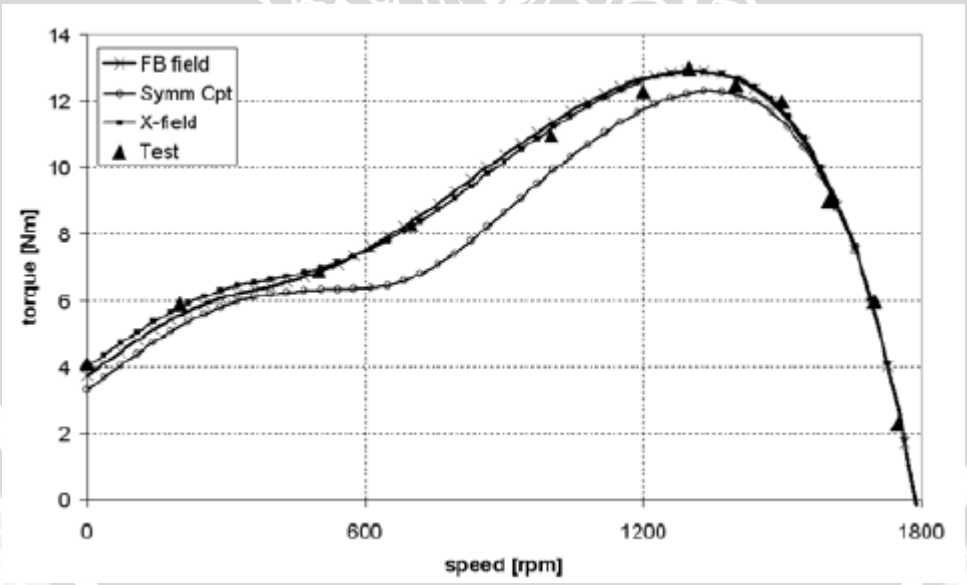
Lampiran 3

Lampiran 3. Karakteristik Motor Induksi Satu fasa

1. Karakteristik Efisiensi – Putaran



2. Karakteristik Torsi - Putaran



Lampiran 4

Lampiran 4. Tabel Perhitungan Harmonisa ke-41