

**STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA WAKTU TERHADAP
TORSI DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA
RECLAIMER TRAVELLING SYSTEM DI PLTU PAITON UNIT 5**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**RIZA AGUS FAISAL
NIM. 0810630088-63**

**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA WAKTU TERHADAP
TORSI DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA
RECLAIMER TRAVELLING SYSTEM DI PLTU PAITON UNIT 5**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
RIZA AGUS FAISAL
NIM. 0810630088-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Soemarwanto, M.T.
NIP. 19500715 198003 1 002

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH ARUS HARMONISA WAKTU TERHADAP

TORSI DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA

RECLAIMER TRAVELLING SYSTEM DI PLTU PAITON UNIT 5

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

RIZA AGUS FAISAL

NIM. 0810630088-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 04 Juni 2015

Majelis Penguji :

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Dosen Penguji III

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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahiim. Alhamdulillah, skripsi dengan judul “**Studi Pengaruh Arus Harmonisa Waktu Terhadap Torsi dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Reclaimer Travelling System di Pltu Paiton Unit 5**” dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Ucapan terima kasih semoga tersampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan. Begitu banyak pihak yang membantu dalam proses penulisan skripsi ini sehingga tidak mungkin disebutkan satu per satu. Dengan rasa hormat, disampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayah dan ibu tercinta, Syafiudin dan Sri Umami. Orang tua tanpa gelar pendidikan. Orang tua yang hidup di sawah, membanting tulang, dan berhutang uang demi melihat anaknya menjadi sarjana.
2. Bapak M.Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi dan Ibu Dr.Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
4. Bapak Ir.Hery Purnomo, M.T. dan Bapak Ir. Soemarwanto, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
5. Bapak Moch. Rif'an ST., M.T. selaku dosen pembimbing akademik dan Bapak/Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
6. Seluruh staf PT. YTL Jawa Timur yang telah memberikan dukungan terbaik dalam proses penelitian ini. Mas Harmawan ST., selaku kakak tingkat dan *engineer* di PT. YTL Jawa Timur yang telah banyak meluangkan waktu untuk membantu terselesaikannya skripsi ini.

7. Kakak dan adik tercinta, Ratno Sujarwadi dan Regita Triani Mardiya.
8. Teman-teman angkatan 2008 paket A. Terima kasih atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan.

Dalam penyusunan skripsi ini, banyak terdapat kekurangan dan kelemahan karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain. Oleh karena itu, saran dan kritik dari semua pihak akan sangat berguna untuk perbaikan skripsi ini dikemudian hari. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 17 Juni 2015

Penulis



RINGKASAN

Riza Agus Faisal. 2015. Studi Pengaruh Arus Harmonisa Waktu Terhadap Torsi dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Pada *Reclaimer Travelling System* di PLTU Paiton Unit 5. Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Pembimbing: (I) Ir. Hery Purnomo, M.T., (II) Ir. Soemarwanto, M.T.

Motor induksi 3 fasa merupakan motor yang digunakan secara luas di dunia industri. Motor ini memerlukan piranti tambahan yang disebut *VSD (Variable Speed Drive)* untuk jenis beban yang memerlukan pengaturan kecepatan secara intensif. Penggunaan *VSD (Variable Speed Drive)* akan mengakibatkan munculnya arus-arus harmonisa yang dikenal dengan istilah arus harmonisa waktu. PT. YTL Jawa Timur sebagai perusahaan yang memiliki dua unit pembangkit listrik tenaga uap (unit 5 & 6) di PLTU Paiton, menggunakan sembilan buah motor induksi 3 fasa dan sebuah *VSD* untuk menggerakkan *reclaimer travelling system*. *Reclaimer travelling system* adalah sebuah alat yang bertugas mengatur posisi *reclaimer* batu bara saat proses bongkar muat dan penyimpanan batu bara di *stacker*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa penggerak *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur.

Data primer dalam penelitian ini adalah arus harmonisa dan kecepatan rotor saat *steady state*. Pengukuran arus harmonisa dilakukan pada terminal salah satu motor induksi tiga fasa penggerak *reclaimer travelling system* dengan menggunakan *power quality analyzer 434/435*. Arus harmonisa diasumsikan seimbang untuk setiap fasa pada terminal motor. Pengukuran kecepatan menggunakan *tachometer Grainger SURH0* dilakukan bersamaan dengan pengukuran arus harmonisa pada terminal motor. Data sekunder yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah *datasheet* motor induksi tiga fasa yang nantinya akan digunakan untuk menentukan parameter-parameter motor induksi tiga fasa penggerak *reclaimer travelling system*. Data-data di atas digunakan untuk menganalisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi tiga fasa penggerak *reclaimer travelling system*. Sedangkan untuk menganalisis torsi dan efisiensi motor induksi tiga fasa tanpa pengaruh arus harmonisa waktu, arus yang mencatu motor diasumsikan berbentuk sinusoida murni dan memiliki nilai efektif yang sama besar dengan nilai efektif dari arus harmonisa waktu.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan torsi dan efisiensi pada motor induksi tiga fasa ketika dicatu oleh sumber yang mengandung arus harmonisa. Torsi mekanik motor yang awalnya sebesar 10,5414 Nm turun sebesar 25,64% menjadi 7,839 Nm, torsi beban motor yang awalnya 10,1227 Nm turun sebesar 25,6% menjadi 7,5613 Nm dan efisiensi motor yang awalnya 84,6297% turun menjadi 80,0212% ketika dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu. Penurunan efisiensi secara umum menunjukkan terjadinya kenaikan rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu.

Kata Kunci: arus harmonisa waktu, motor induksi tiga fasa, torsi, efisiensi, *VSD*

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
RINGKASAN	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
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 Manfaat	3
1.6 Sistematika Pembahasan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Standar Perancangan Motor Induksi Menurut <i>NEMA</i>	4
2.2 Estimasi Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda Menggunakan <i>Datasheet</i>	5
2.3 Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan <i>VSD</i>	19
2.4 Harmonisa	19
2.5 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi dan Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda.....	21
2.5.1 Analisis Torsi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda.....	25
2.5.1.1 Analisis Torsi Mekanik	25
2.5.1.2 Analisis Torsi Beban	26
2.5.2 Analisis Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda	29
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1 Diagram Alir Penelitian	30
3.2 Lokasi Penelitian.....	30



3.3	Pengambilan Data	31
3.3.1	Data Primer	31
3.3.2	Data Sekunder	31
3.4	Estimasi Parameter Motor dari <i>Datasheet</i>	31
3.5	Analisis Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi dan Efisiensi	33
3.6	Menarik Kesimpulan	33
BAB IV ANALISIS PENGARUH ARUS HARMONISA WAKTU TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI 3 FASA		34
4.1	Estimasi Parameter Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6	34
4.2	Analisis Torsi Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6	43
4.2.1	Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi Mekanik	43
4.2.2	Torsi Mekanik Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)	46
4.2.3	Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi Beban	47
4.2.4	Torsi Beban Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)	48
4.3	Analisis Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6	50
4.3.1	Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Efisiensi	50
4.3.3	Efisiensi Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)	50
BAB V PENUTUP		52
5.1	Kesimpulan	52
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA		54
LAMPIRAN		55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Berdasarkan Kelas NEMA.....	4
Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda.....	6
Gambar 2.3 Aliran Daya pada Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda.....	8
Gambar 2.4 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda Pada Kondisi Awal.....	11
Gambar 2.5 Pengaruh Arus Harmonisa ke-3 Terhadap Arus Fundamental.....	20
Gambar 2.6 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu.....	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.2 Diagram Alir Estimasi Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda.....	32
Gambar 4.1 Torsi Mekanik Yang Dihasilkan Akibat Arus Harmonisa Waktu Urutan Positif dan Negatif.....	45
Gambar 4.2 Perbandingan Torsi Mekanik dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu.....	46
Gambar 4.3 Perbandingan Torsi Beban dan Torsi Mekanik dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu.....	49
Gambar 4.4 Perbandingan Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu.....	51

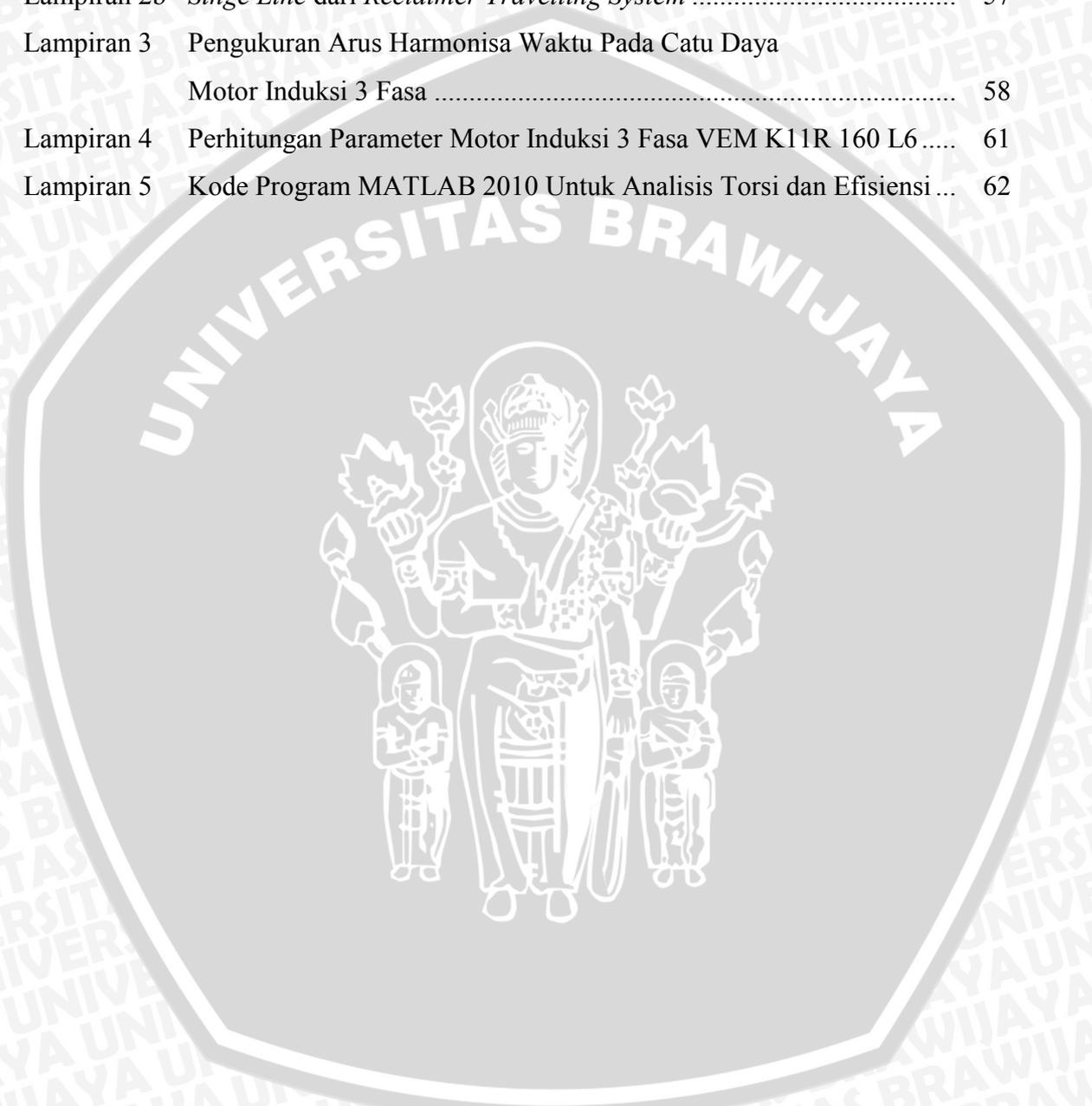
DATAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Pengaruh Perubahan Parameter Terhadap Torsi	18
Tabel 4.1 Parameter Referensi	38
Tabel 4.2 Parameter Hasil Perhitungan	41
Tabel 4.3 Selisih Antara Parameter Referensi dan Perhitungan	41
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Parameter $R_{rs}, X_{rx}, Z_{rs} , R_{rn}, X_{rn}, Z_{rn} , T_{mek}, T_{max},$ dan T_s	42
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Arus Harmonisa dan Kecepatan Rotor Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda	43
Tabel 4.6 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu Terhadap Torsi Mekanik	45
Tabel 4.7 Perhitungan Torsi Beban Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu	48



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 <i>Datasheet</i> Motor Induksi 3 Fasa Pabrikan VEM	55
Lampiran 2a <i>Single Line</i> dari <i>Reclaimer</i> Batu Bara	56
Lampiran 2b <i>Singe Line</i> dari <i>Reclaimer Travelling System</i>	57
Lampiran 3 Pengukuran Arus Harmonisa Waktu Pada Catu Daya Motor Induksi 3 Fasa	58
Lampiran 4 Perhitungan Parameter Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6	61
Lampiran 5 Kode Program MATLAB 2010 Untuk Analisis Torsi dan Efisiensi ...	62



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin induksi adalah mesin berat yang digunakan secara luas di dunia industri (P.C. Sen, 1997:207). Hal ini karena mesin induksi relatif murah, *low maintenance*, handal dan memiliki efisiensi yang tinggi. Desainnya yang sederhana dan mantap memungkinkan mesin ini digunakan dalam berbagai kondisi termasuk kondisi berdebu tergantung dari *IP (Ingress Protection)* yang dimiliki mesin tersebut. Mesin induksi memiliki berbagai macam karakteristik untuk memenuhi kebutuhan beban. Jenis mesin induksi yang paling sering digunakan dalam dunia industri adalah motor induksi 3 fasa.

PT. YTL (*Yeoh Tiong Lay*) Jawa Timur adalah salah satu perusahaan listrik yang memiliki *power plant* di wilayah Paiton, Probolinggo. Perusahaan ini memiliki 2 dari 9 unit pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di area tersebut, yaitu unit 5 dan 6. Setiap unit yang dimiliki oleh PT. YTL Jawa Timur berkapasitas 765 MW. Secara garis besar, area tiap unitnya dibagi menjadi 4 bagian utama. *Main Plant* sebagai tempat proses pengolahan batu bara dan air menjadi listrik, *Coal Plant* sebagai tempat pemrosesan batu bara mulai dari *proses unloading, stacking, dan reclaiming* hingga siap dikirim ke penggilingan (*mill*), dan *Water Treatment Plant* yang bertugas menjaga kualitas air, baik yang akan dikirim ke boiler maupun untuk konsumsi karyawan. Selain itu *Water Treatment Plant* juga menjaga agar tidak ada limbah air yang dibuang ke laut. Di luar tiga area tersebut berdiri perkantoran yang bertugas mengurus proses administrasi.

Di unit 5 PLTU Paiton, motor induksi 3 fasa merupakan penggerak utama dalam proses penunjang produksi listrik. Sistem *conveyor*, pompa, kipas, *water treatment*, dan penggilingan digerakkan oleh motor induksi 3 fasa. Begitu juga di *Coal Plant*, hampir semua motor yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa dengan daya dan karakteristik yang berbeda-beda. Salah satu alat yang berada di *Coal Plant*, adalah *reclaimer* batu bara. *Reclaimer* berfungsi meratakan, dan menghancurkan batu bara sebelum memasuki *mill*. *Reclaimer* memiliki *travelling system* atau sistem penggerak yang memungkinkan alat ini bergerak dalam lintasan yang telah disediakan. *Travelling system* menggunakan *VSD (Variable Speed Drive)* untuk mengatur kecepatan 9 buah motor induksi 3 fasa yang bekerja secara serentak. Penggunaan *VSD* sebagai beban non-linier menyebabkan munculnya arus harmonisa waktu yang mengalir pada catu daya motor. “Arus

harmonisa waktu menghasilkan medan magnet putar yang lebih cepat dari medan magnet putar yang dihasilkan arus fundamentalnya”(P.C. Sen, 1997:270). Selain dibedakan berdasarkan orde harmonisanya, arus harmonisa waktu juga dibedakan berdasarkan arah putaran fasornya. Arah putaran fasor akan mempengaruhi arah putaran medan magnet putar yang dihasilkan di celah udara.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa yang digunakan pada reclaimer travelling system. Diharapkan penelitian ini menjadi referensi bagi PT. YTL Jawa Timur untuk meningkatkan keandalan reclaimer travelling system dan menjadi sarana pembelajaran bagi pihak-pihak yang berkeinginan mempelajari dampak arus harmonisa waktu terhadap motor induksi 3 fasa.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang yang ada, maka rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara menentukan parameter motor induksi 3 fasa yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur tanpa melepas motor induksi 3 fasa dari catu daya.
2. Seberapa besar arus harmonisa waktu pada catu daya motor induksi 3 fasa yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur.
3. Bagaimana pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi pada motor induksi 3 fasa yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan penelitian ini dibatasi pada:

1. Motor induksi 3 fasa yang dibahas adalah motor induksi 3 fasa tipe VEM K11R 160 L6 yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur.
2. Pengambilan data arus harmonisa waktu menggunakan *power quality analyser* 434/435.
3. Pengukuran kecepatan motor induksi 3 fasa saat beroperasi menggunakan *non-contact tachometer* grainger 5URH0.

4. Data tentang motor induksi 3 fasa tipe VEM K11R 160 L6 didapatkan dari *datasheet* motor VEM yang ada di ruang dokumen milik PT. YTL Jawa Timur.
5. Besar arus harmonisa waktu yang mengalir pada masing-masing fasa pada terminal motor induksi 3 fasa diasumsikan seimbang sehingga beda sudut antara fasa A, B, dan C sebesar 120° listrik.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi motor induksi 3 fasa tipe VEM K11R 160 L6 yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan sumber acuan bagi PT. YTL Jawa Timur untuk mengetahui dampak arus harmonisa waktu yang dihasilkan oleh *VSD* terhadap motor induksi 3 fasa tipe VEM K11R 160 L6 yang digunakan pada *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit.5.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

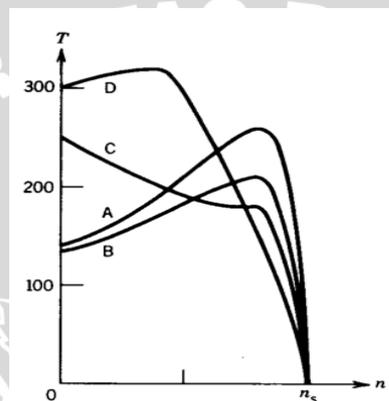
- BAB I** : Membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan pembahasan, dan sistematika pembahasan.
- BAB II** : Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.
- BAB III** : Berisi tentang metode pengambilan data serta metode analisis data.
- BAB IV** : Membahas tentang estimasi parameter dan analisis pengaruh harmonisa terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.
- BAB V** : Berisi tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Standar Perancangan Motor Induksi 3 Fasa Menurut NEMA

National Electrical Manufacturers' Association (NEMA) menetapkan standar untuk perancangan motor induksi rotor sangkar. Standar ini bertujuan untuk memenuhi berbagai karakteristik beban yang ada di dunia industri. *NEMA* mengklasifikasikan motor induksi menjadi 4 kelas. Gambar 2.1 menunjukkan perbandingan karakteristik torsi-kecepatan antara 4 kelas motor induksi rotor sangkar.



Gambar 2.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Berdasarkan Kelas NEMA
Sumber: P.C. Sen, 1997:253

Dengan:

T : torsi (Nm)

n : kecepatan motor (rpm)

n_s : kecepatan sinkron motor (rpm)

A, B, C, D: kelas motor induksi 3 fasa rotor sangkar menurut *NEMA*.

Gambar 2.1 melukiskan karakteristik motor induksi 3 fasa rotor sangkar pada setiap kelas yang akan dijelaskan sebagai berikut (P.C. Sen, 1997:252).

- **Kelas A (sangkar tunggal tahanan rendah)**

Motor kelas A memiliki karakteristik antara lain: besar torsi beban awal yang normal, arus awal yang tinggi, dan slip operasi yang rendah. Resistansi rotor yang rendah akan bekerja efisien pada slip yang rendah. Slip beban penuh motor kelas ini kurang dari 0,05. Motor ini cocok untuk beban dengan torsi beban awal rendah seperti kipas dan pompa.

- **Kelas B (rotor sangkar dalam)**

Motor kelas B memiliki karakteristik antara lain: torsi beban awal berkisar 150% dari torsi beban nominal, arus awal yang rendah, dan slip operasi yang rendah. Besar torsi beban awal motor kelas B hampir sama dengan torsi beban awal motor kelas A, akan tetapi besar arus awal dari motor kelas B sekitar 75% dari arus awal motor kelas A. Arus awal yang rendah didesain dengan meningkatkan nilai reaktansi bocor (X_m). Peningkatan nilai X_m akan mengurangi besar torsi beban maksimum. Motor ini cocok untuk penggerak dengan kecepatan tetap. Motor ini memiliki slip beban penuh kurang dari 0,05.

- **Kelas C (rotor sangkar ganda)**

Motor kelas C memiliki karakteristik antara lain: torsi beban awal yang besar yaitu sekitar 200% dari torsi beban nominal. Arus start yang dibutuhkan relatif rendah. Jika dibandingkan dengan motor kelas A dan B, Resistansi rotor motor kelas C lebih besar. Slip beban penuh motor ini berkisar antara 0,015 hingga 0,05. Efisiensi motor ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan efisiensi motor kelas A dan B. Motor kelas C cocok untuk beban seperti kompresor, konveyor, *crusher*, dll.

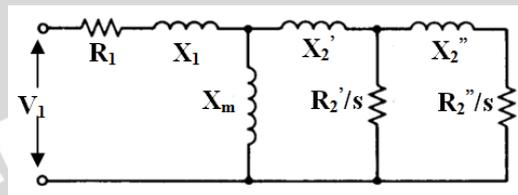
- **Kelas D (sangkar tunggal resistansi tinggi)**

Motor kelas D memiliki ciri-ciri, torsi start sekitar 300% torsi beban nominal, arus start rendah dan slip operasi yang tinggi. Torsi beban maksimum terjadi saat slip $\geq 0,5$. Slip beban penuh berkisar antara 0,08 dan 0,15 sehingga efisiensi motor rendah.

2.2 Estimasi Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda Menggunakan *Datasheet*

Untuk mendapatkan motor induksi 3 fasa yang mampu menghasilkan torsi besar dengan arus *start* yang relatif kecil, maka didesain motor induksi 3 fasa jenis rotor sangkar ganda. Rotor jenis ini terdiri dari dua lapisan, lapisan luar dan lapisan dalam. Rotor lapisan luar dan dalam dibuat dengan batang-batang konduktor yang disusun sedemikian rupa membentuk sangkar tupai dan dihubungkan dengan cincin disetiap ujungnya. Resistansi batang-batang konduktor penyusun rotor lapisan dalam lebih kecil jika dibandingkan dengan resistansi batang-batang konduktor penyusun rotor bagian luar. Besar reaktansi bocor dan resistansi rotor lapisan dalam bervariasi tergantung pada slip motor. Pada slip rendah (seperti saat beban penuh), nilai reaktansi rotor lapisan dalam bisa diabaikan. Pada slip tinggi, sebagian besar arus mengalir pada batang-batang konduktor penyusun rotor bagian luar dan nilai reaktansi rotor bagian dalam tidak bisa diabaikan (P.C. Sen, 1997:251).

Pada umumnya menentukan parameter motor induksi 3 fasa dilakukan dengan pengujian-pengujian yang mengacu pada standar *IEEE 112*. Akan tetapi, pada praktek di lapangan terkadang pengujian semacam ini tidak mungkin dilakukan. Padahal untuk melakukan analisis terhadap motor induksi 3 fasa, parameter-parameternya harus diketahui. Pabrikan motor induksi 3 fasa biasanya menyediakan *datasheet* yang berisi informasi tentang karakteristik motor tanpa mencantumkan besar nilai parameternya. Rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Sumber: P.C. Sen, 1997:251

Dengan:

V_1 : tegangan terminal stator per fasa(volt)

R_1 : resistansi stator per fasa(ohm)

X_1 : reaktansi bocor stator per fasa(ohm)

X_m : reaktansi magnetik stator per fasa(ohm)

R_2' : resistansi rotor lapisan luar per fasa(ohm)

R_2'' : resistansi rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

X_2' : reaktansi bocor rotor lapisan luar per fasa(ohm)

X_2'' : reaktansi bocor rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

s : slip

Impedansi rotor bagian dalam merupakan hubungan seri antara resistansi rotor lapisan dalam per fasa dan reaktansi bocor rotor lapisan dalam per fasa. Ciri khas rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda terletak pada susunan paralel antara resistansi rotor bagian luar dan impedansi rotor bagian dalam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Penentuan bentuk rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda sangat penting guna melakukan estimasi parameter motor menggunakan *datasheet*.

Data motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang bisa didapatkan dari *datasheet* antara lain: tegangan terminal stator, arus nominal, arus awal, arus

maksimum, efisiensi, kecepatan rotor, kecepatan sinkron, daya keluaran, torsi mekanik nominal, torsi mekanik awal dan torsi mekanik maksimum.

Tegangan terminal stator yang terdapat pada *datasheet* merupakan tegangan antar fasa pada terminal stator motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat bekerja pada daya nominal. Jika terminal motor dihubung bintang, secara matematis relasi antara tegangan terminal stator dan tegangan terminal stator per fasa adalah sebagai berikut:

$$V_1 = \frac{V_n}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

Dengan:

V_1 : tegangan terminal stator per fasa(volt)

V_n : tegangan terminal stator(volt)

Jika terminal motor dihubung delta, secara matematis:

$$V_1 = V_n \quad (2.2)$$

Dengan:

V_1 : tegangan terminal stator per fasa(volt)

V_n : tegangan terminal stator(volt)

Arus nominal yang terdapat pada *datasheet* menunjukkan arus yang mengalir pada tiap belitan fasa pada stator dari motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat bekerja pada daya nominal. Jika terminal motor dihubung bintang, secara matematis relasi antara arus nominal dan arus stator per fasa adalah sebagai berikut:

$$I_1 = I_n \quad (2.3)$$

Dengan:

I_1 : arus stator per fasa(ampere)

I_n : arus nominal(ampere)

Untuk hubungan delta, secara matematis:

$$I_1 = \frac{I_n}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

Dengan:

I_1 : arus stator per fasa(ampere)

I_n : arus nominal(ampere)

Efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang terdapat pada *datasheet* merupakan parameter yang menunjukkan besarnya energi elektrik yang terkonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk persentase. Besar nilai efisiensi secara matematis dijelaskan pada persamaan 2.5.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Dengan:

η : efisiensi(%)

P_{out} : daya keluaran motor(W)

P_{in} : daya masukan motor(W)

Slip merupakan selisih kecepatan sinkron dan kecepatan rotor yang dinyatakan dalam bentuk perbandingan. Slip dapat dinyatakan secara matematis seperti pada persamaan 2.6.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.6)$$

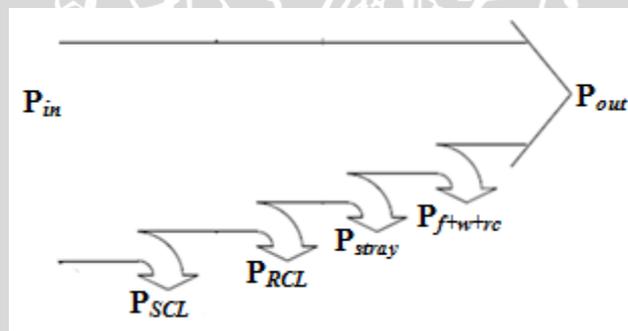
Dengan:

s : slip

n_s : kecepatan sinkron(rpm)

n_r : kecepatan rotor(rpm)

Daya keluaran yang terdapat pada *datasheet* motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda merepresentasikan besar daya keluran pada poros rotor. Gambar 2.3 menunjukkan aliran daya pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.



Gambar 2.3 Aliran Daya pada Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda
Sumber: Kaun Lee, dkk, 2012:2

Dengan :

P_{in} : daya masukan(W)

P_{SCL} : rugi tembaga stator(W)

P_{RCL} : rugi tembaga rotor(W)

P_{stray} : rugi *stray*(W)

P_{f+w+rc} : rugi gesekan, angin dan inti besi(W)

P_{out} : daya keluaran motor induksi(W)

Gambar 2.3 merupakan gambar aliran daya pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda berdasarkan rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang direkomendasikan oleh *IEEE*. *IEEE* menganjurkan rugi inti besi

digabungkan dengan rugi gesekan dan angin karena besarnya akan menjadi tetap untuk berbagai slip operasi (P.C. Sen, 1997:227). Pada slip operasi rendah (seperti saat slip nominal) nilai rugi gesekan dan angin akan semakin besar jika dibandingkan saat motor beroperasi pada slip tinggi (seperti saat slip awal). Sebaliknya, rugi inti besi akan semakin rendah pada slip operasi rendah dan semakin tinggi slip operasi tinggi. Oleh karena itu, rugi inti besi dapat diabaikan pada slip tinggi karena nilainya yang sangat kecil.

Berikut ini langkah-langkah untuk menentukan parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dari *datasheet* (Kaun Lee, dkk, 2012):

1. Menentukan besar slip, P_{in} , P_{f+w+rc} , P_{stray} , P_{conv} , P_{RCL} , P_{AG} , P_{SCL} , T_{nom} , T_n , R_1 , dan T_{loss} .

Menurut salah satu jurnal pada konferensi internasional *ICADME (International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering)* yang berjudul “*Parameters Calculation of 5 HP AC Motors*” halaman 12B-2, menyatakan bahwa:

$$P_{f+w+rc} = 3,5\%P_{in} \quad (2.7)$$

Dengan:

P_{f+w+rc} : rugi-rugi gesekan, angin dan inti besi (W)

P_{in} : daya masukan (W)

Rugi stray ditentukan berdasarkan standar *IEEE 112* tahun 2004 halaman 15. Rugi *stray* pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda merupakan bagian dari rugi-rugi total selain rugi tembaga stator, rugi tembaga rotor, serta rugi gesekan, angin dan inti besi. Asumsi besar P_{stray} menurut standar *IEEE 112* halaman 18 adalah sebanding dengan *rating* motor induksi. Untuk rating mesin dibawah 90 kW, nilai P_{stray} secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$P_{stray} = 1,8\%P_{out} \quad (2.8)$$

Dengan:

P_{stray} : rugi-rugi *stray* (W)

P_{in} : daya masukan (W)

Adanya nilai P_{stray} , akan meningkatkan akurasi perkiraan parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda. Selain rugi *stray* ada pula rugi stator dan rugi rotor yang memiliki hubungan dengan daya terkonversi dan daya pada celah udara. Secara matematis hubungan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_{conv} = P_{out} + P_{f+w+rc} + P_{stray} \quad (2.9)$$

$$P_{AG} = \frac{P_{conv}}{1-s} \quad (2.10)$$

$$P_{RCL} = P_{AG} - P_{conv} \quad (2.11)$$

$$P_{SCL} = P_{in} - P_{AG} \quad (2.12)$$

Dengan :

P_{conv} : daya yang terkonversi dalam bentuk energi mekanik(W)

P_{SCL} : rugi-rugi tembaga stator(W)

P_{AG} : daya yang dikirim melalui celah udara(W)

P_{RCL} : rugi-rugi tembaga rotor(W)

P_{in} : daya Masukan(W)

P_{out} : daya Keluaran(W)

Daya pada celah udara selanjutnya digunakan untuk mencari nilai torsi mekanik. Dengan memasukkan nilai slip nominal, besar torsi mekanik nominal, torsi beban nominal dan torsi rugi-rugi mekanik bisa ditentukan dengan persamaan 2.13 hingga 2.15.

$$T_{nom} = 9,55 \frac{P_{AG}}{3n_s} \quad (2.13)$$

$$T_n = \frac{P_{out}}{3n_r} \quad (2.14)$$

$$T_{loss} = T_{nom} - T_n \quad (2.15)$$

Dengan:

T_{nom} : torsi mekanik nominal per fasa(Nm)

T_{loss} : torsi mekanik yang hilang per fasa akibat P_{f+w+rc} dan P_{stray} (Nm)

T_n : torsi beban nominal per fasa(Nm)

n_s : kecepatan sinkron(rpm)

n_r : kecepatan rotor(rpm)

Torsi rugi-rugi mekanik(T_{loss}) akan bernilai konstan untuk setiap slip operasi. Resistansi stator(R_1) pada rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda didapatkan menggunakan persamaan 2.16 berikut.

$$R_1 = \frac{P_{RCL}}{3I_n^2} \quad (2.16)$$

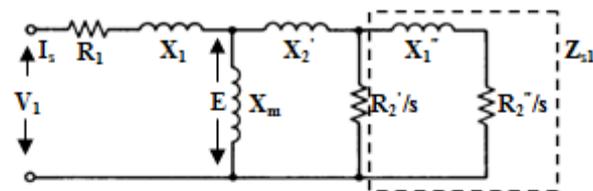
Dengan:

R_1 : resistansi pada stator per fasa(ohm)

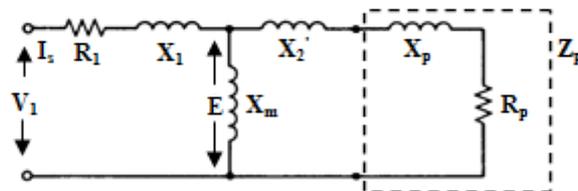
P_{RCL} : rugi tembaga stator(W)

2. Menganalisis kondisi awal(*start*).

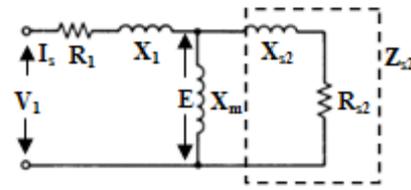
Kondisi awal motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dianalisis dengan memperhatikan parameter-parameter berikut: arus awal, torsi mekanik awal per fasa, tegangan terminal stator per fasa, impedansi total motor saat kondisi awal, resistansi rotor saat kondisi awal, resistansi total saat kondisi awal, reaktansi rotor saat kondisi awal, reaktansi stator, reaktansi total saat kondisi awal, dan impedansi rotor saat kondisi awal. Rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat kondisi awal ditunjukkan pada Gambar 2.4.



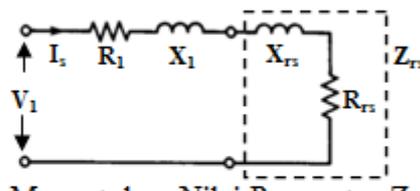
(a) Menentukan Nilai Parameter Z_{s1}



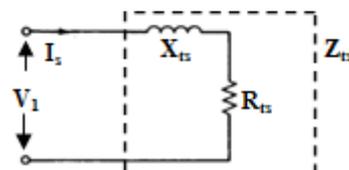
(b) Menentukan Nilai Parameter Z_p



(c) Menentukan Nilai Parameter Z_{s2}



(d) Menentukan Nilai Parameter Z_{rs}



(e) Menentukan Nilai Parameter Z_{ts}

Gambar 2.4 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda pada Kondisi Awal

Sumber: P.C. Sen, 1997:231

Dengan:

V_1 : tegangan terminal stator per fasa(volt)

I_s : arus awal(ampere)

R_1 : resistansi stator per fasa(ohm)

X_1 : reaktansi bocor stator per fasa(ohm)

X_m : reaktansi magnetik stator per fasa(ohm)

R_2' : resistansi rotor lapisan luar per fasa(ohm)

R_2'' : resistansi rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

X_2' : reaktansi bocor rotor lapisan luar per fasa(ohm)

X_2'' : reaktansi bocor rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

E : tegangan terinduksi per fasa(ohm)

R_p : resistansi pada impedansi Z_p per fasa(ohm)

X_p : reaktansi pada impedansi Z_p per fasa(ohm)

Z_p : impedansi paralel antara R_2'' dan Z_{s1} per fasa(ohm)

Z_{s1} : impedansi rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

R_{s2} : resistansi pada impedansi Z_{s2} per fasa(ohm)

X_{s2} : reaktansi pada impedansi Z_{s2} per fasa(ohm)

Z_{s2} : impedansi rotor sebelum diparalel dengan X_m per fasa(ohm)

R_{rs} : resistansi rotor saat kondisi awal per fasa(ohm)

X_{rs} : reaktansi rotor saat kondisi awal per fasa(ohm)

Z_{rs} : impedansi rotor saat kondisi awal per fasa(ohm)

R_{ts} : resistansi total motor saat kondisi awal per fasa(ohm)

X_{ts} : reaktansi total motor saat kondisi awal per fasa(ohm)

Z_{ts} : impedansi total motor saat kondisi awal per fasa(ohm)

s : slip(bernilai 1 untuk kondisi awal)

Gambar 2.4 merupakan rangkaian pengganti motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda pada saat kondisi awal sesuai rekomendasi dari *IEEE*. *IEEE* menganjurkan parameter X_m tidak dihilangkan saat analisis kondisi awal, melainkan diparalel dengan parameter-parameter rotor lainnya(P.C Sen, 1997:230). Gambar 2.4 menunjukkan tahapan penyederhanaan dari Gambar 2.2 yang secara matematis dapat dijelaskan dengan persamaan-persamaan sebagai berikut.

$$s = 1 \quad (2.17)$$

$$Z_{s1} = R_2''/s + jX_2'' \quad (2.18)$$

$$Z_p = \frac{R'_2 \cdot Z_{s1}}{R'_2 + Z_{s1}} = R_p + jX_p \quad (2.19)$$

$$Z_{s2} = Z_p + jX'_2 = R_{s2} + jX_{s2} \quad (2.20)$$

$$Z_{rs} = \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_{rs} + jX_{rs} \quad (2.21)$$

$$Z_{ts} = (R_1 + R_{rs}) + j(X_1 + X_{rs}) = R_{ts} + jX_{ts} \quad (2.22)$$

Pada *datasheet* biasanya akan didapatkan informasi tentang arus dan torsi beban awal yang berupa faktor pengali terhadap arus dan torsi beban nominal. Untuk mempermudah analisis, maka digunakan torsi mekanik awal daripada menggunakan torsi beban awal. Besar arus dan torsi mekanik awal dapat dicari menggunakan persamaan 2.23 dan 2.24

$$I_s = k_{is} \cdot I_n \quad (2.23)$$

$$T_s = (k_{ts} \cdot T_n) + T_{loss} \quad (2.24)$$

Dengan:

I_s : arus awal(A)

T_s : torsi mekanik awal per fasa(Nm)

k_i : faktor pengali arus awal

k_{ts} : faktor pengali torsi beban awal

karena besar tegangan terminal motor tidak berubah untuk berbagai slip operasi, maka persamaan 2.1 dapat digunakan untuk mendapatkan tegangan terminal stator per fasa untuk kondisi awal.

Parameter X_1 merupakan parameter yang menunjukkan besar reaktansi belitan stator pada rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda. Berdasarkan standar *IEEE* 112 tahun 2004 untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat kondisi start, X_1 memiliki korelasi dengan reaktansi total motor(X_{ts}) seperti persamaan 2.25.

$$X_1 = 0,3 \cdot X_{ts} \quad (2.25)$$

Persamaan 2.26 hingga 2.31 digunakan untuk menentukan parameter $|Z_{ts}|$, R_{rs} , R_{ts} , X_{rs} , X_{ts} , dan $|Z_{rs}|$.

$$|Z_{ts}| = \left| \frac{V_1}{I_s} \right| \quad (2.26)$$

$$R_{rs} = 0,1047 \frac{T_s \cdot n_s}{I_s^2} \quad (2.27)$$

$$R_{ts} = R_1 + R_{rs} \quad (2.28)$$

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{ts}^2 - R_{ts}^2} \quad (2.29)$$

$$X_{rs} = X_{ts} - X_1 \quad (2.30)$$

$$|Z_{rs}| = \sqrt{R_{rs}^2 + X_{rs}^2} \quad (2.31)$$

Dengan :

$|Z_{ts}|$: *magnitude* impedansi motor saat kondisi awal(ohm)

$|Z_{rs}|$: *magnitude* impedansi rotor saat kondisi awal(ohm)

Dari langkah satu hingga langkah tiga, parameter R_1 dan X_1 telah berhasil didapatkan. Parameter-parameter yang lain akan didapatkan secara simultan dengan memperhatikan kondisi khusus untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

3. Menganalisis saat beban nominal

Analisis motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat beban nominal dilakukan dengan menghitung parameter R_{rn} , R_m , $|Z_{tn}|$, X_{tn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, dan $\cos\phi$ menggunakan persamaan 2.32 hingga 2.38.

$$R_{rn} = \frac{P_{AG}}{3I_n^2} \quad (2.32)$$

$$R_{tn} = R_1 + R_{rn} \quad (2.33)$$

$$|Z_{tn}| = \left| \frac{V_1}{I_n} \right| \quad (2.34)$$

$$X_{tn} = \sqrt{Z_{tn}^2 - R_{tn}^2} \quad (2.35)$$

$$X_{rn} = X_{tn} - X_1 \quad (2.36)$$

$$|Z_{rn}| = \sqrt{R_{rn}^2 + X_{rn}^2} \quad (2.37)$$

$$\cos\phi = \cos\left(\tan^{-1} \frac{X_{tn}}{R_{tn}}\right) \quad (2.38)$$

Dengan:

V_1 : tegangan terminal stator per fasa(volt)

P_{AG} : daya yang dikirim melalui celah udara(W)

R_{rn} : resistansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

X_{rn} : reaktansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

$|Z_{rn}|$: *magnitude* impedansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

R_m : resistansi total motor saat beban nominal per fasa(ohm)

X_m : reaktansi total motor saat beban nominal per fasa(ohm)

$|Z_m|$: *magnitude* impedansi total motor saat beban nominal per fasa(ohm)

$\cos\phi$: faktor daya motor

4. Menganalisis torsi mekanik maksimum per fasa.

Pada *datasheet* biasanya nilai torsi beban maksimum dituliskan dalam bentuk faktor pengali terhadap torsi beban nominalnya. Penggunaan torsi mekanik

maksimum dibanding torsi beban maksimum akan mempermudah analisis. Torsi mekanik maksimum dapat dicari dengan persamaan 2.39.

$$T_{max} = (K_{tmax} \cdot T_n) + T_{loss} \quad (2.39)$$

Dengan:

T_{max} : torsi mekanik maksimum per fasa(Nm)

T_n : torsi beban nominal(Nm)

K_{tmax} : faktor pengali torsi beban maksimum(Nm)

T_{loss} : torsi mekanik yang hilang per fasa akibat P_{f+w+rc} dan P_{stray} (Nm)

5. Menentukan parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' .

Menentukan parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' dengan secara bersamaan dengan memperhatikan kondisi khusus untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda. Hal-hal yang perlu diperhatikan ketika menentukan parameter-parameter untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda adalah sebagai berikut(P.C. Sen, 1997:251):

- Resistansi rotor lapisan luar(R_2') selalu lebih besar dari pada resistansi rotor lapisan dalam(R_2'').
- Pada slip rendah(mengacu pada kondisi beban penuh) nilai reaktansi X_2'' bisa dianggap tidak ada. Akan tetapi pada saat slip tinggi, nilai X_2'' tidak bisa diabaikan. Untuk itu umumnya nilai X_2'' lebih besar daripada nilai X_2' .

Untuk menentukan nilai awal dari parameter R_2' , nilai diatur sebaiknya sedikit lebih besar dari pada besar R_{rs} yang telah dihitung sebelumnya pada persamaan 2.27. Parameter R_2'' selalu lebih kecil dari pada R_2' . Nilai awal dari parameter ini dibuat sedikit lebih kecil dari pada nilai awal R_2' . Nilai awal parameter X_2' diatur 2 kali nilai X_1 . Nilai awal parameter X_2'' diatur 2 kali nilai X_2' . Nilai awal untuk X_m bisa berapa saja, akan tetapi setelah menentukan nilai awalnya, besar nilai X_m harus dikoreksi dengan memperhatikan parameter Q_{in} , $|E|$, I_{s2} , Q_m , I_m saat kondisi beban penuh.

Motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda memerlukan reaktansi dalam proses pengoperasiannya. Dengan memasukkan nilai slip nominal pada persamaan 2.18 dan 2.19 maka nilai Z_{s2} , X_{s2} dan R_{s2} bisa dicari menggunakan persamaan 2.20. Secara matematis reaktansi total per fasa bisa didapatkan dengan persamaan berikut.

$$Q_{in} = \frac{P_{in}}{3 \cos \varphi} \sin(\cos^{-1}(\cos \varphi)) \quad (2.40)$$

Dengan:

Q_{in} : reaktansi total motor saat beban nominal per fasa(var)

P_{in} : daya masukan saat beban nominal(W)

Besar *magnitude* tegangan terinduksi per fasa, atau lebih dikenal dengan ggl lawan dapat dicari menggunakan persamaan 2.41 sebagai berikut.

$$|E| = |I_1 \cdot |Z_{rn}| \quad (2.41)$$

Dengan:

$|E|$: *magnitude* tegangan terinduksi saat beban nominal per fasa(ohm)

I_1 : arus stator per fasa(ampere)

$|Z_{rn}|$: *magnitude* impedansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

Arus pada impedansi Z_{s2} dapat ditentukan dengan melakukan perhitungan persamaan 2.18 hingga 2.20 menggunakan nilai parameter R_2' , R_2'' , X_2' , dan X_2'' . Setelah itu tentukan nilai arus pada impedansi Z_{s2} dengan persamaan 2.42.

$$I_{s2} = \frac{|E|}{\sqrt{R_{s2}^2 + X_{s2}^2}} \quad (2.42)$$

Dengan:

I_{s2} : arus pada impedansi Z_{s2} (ampere)

R_{s2} : resistansi pada impedansi Z_{s2} per fasa(ohm)

X_{s2} : reaktansi pada impedansi Z_{s2} per fasa(ohm)

Besar reaktansi magnetik per fasa dapat dicari menggunakan persamaan 2.43 sebagai berikut.

$$Q_m = Q_{in} - I_n^2 X_1 - I_{s2}^2 X_{s2} \quad (2.43)$$

Dengan:

Q_m : reaktansi magnetik saat beban nominal per fasa(var)

Besar arus magnetisasi yang mengalir pada reaktansi magnetisasi dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$I_m = \frac{|E|}{X_m} \quad (2.44)$$

Dengan:

I_m : arus magnetisasi(ampere)

jika nilai awal X_m disebut A dan nilai X_m melalui persamaan 2.45 disebut B, maka:

$$B = X_m = \frac{Q_m}{I_m^2} \quad (2.45)$$

Dengan memperhatikan syarat penentuan nilai X_m , Jika $A > B$ maka naikkan nilai A dan masukkan nilainya ke persamaan 2.44. kemudian hitung ulang persamaan 2.45 dan perhatikan syarat penentuan X_m . Jika $A < B$ maka turunkan nilai A dan masukkan nilainya ke persamaan 2.44. kemudian hitung ulang persamaan 2.45 dan perhatikan syarat penentuan X_m .

Jika $A \approx B$, maka nilai awal $X_m = A$.

6. Menjadikan nilai R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{nom} , T_{max} , dan T_s yang telah dihitung sebelumnya sebagai referensi.
7. Menghitung kembali nilai R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , dan $|Z_{rn}|$ menggunakan parameter R_1 , X_1 serta nilai awal parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' .

Gunakan persamaan 2.17 hingga 2.21 untuk mencari R_{rs} , X_{rx} dan Z_{rs} . Nilai $|Z_{rs}|$ didapatkan dengan memasukkan hasil dari persamaan 2.21 ke dalam persamaan 2.31. Dan untuk mencari nilai R_{rn} , X_{rn} dan Z_{rn} , masukkan slip nominal pada persamaan 2.18 hingga 2.20 kemudian dilanjutkan persamaan 2.46.

$$Z_{rn} = \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_{rn} + jX_{rn} \quad (2.46)$$

Dengan:

R_{rn} : resistansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

X_{rn} : reaktansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

Z_{rn} : impedansi rotor saat beban nominal per fasa(ohm)

Setelah itu nilai $|Z_{rn}|$ didapatkan dengan memasukkan nilai R_{rn} dan X_{rn} yang telah didapatkan melalui persamaan 2.46 ke dalam persamaan 2.37.

8. Analisis torsi motor dalam berbagai slip operasi.

Untuk mengitung torsi, masukkan slip dari 1 hingga 0 dengan interval 0,01 pada persamaan 2.18 hingga persamaan 2.20. kemudian dilanjutkan dengan persamaan 2.47 hingga 2.50.

$$Z_r = \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_r + jX_r \quad (2.47)$$

$$|Z_t| = |(R_1 + R_r) + j(X_1 + X_r)| = |R_t + jX_t| = \sqrt{R_t^2 + X_t^2} \quad (2.48)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{|Z_t|} \quad (2.49)$$

$$T = 9,55 \frac{I_1^2 \cdot R_r}{n_s} \quad (2.50)$$

Dengan:

Z_{s2} : impedansi rotor sebelum diparalel dengan X_m per fasa(ohm)

X_m : reaktansi magnetisasi(ohm)

R_r : resistansi rotor per fasa(ohm)

X_r : reaktansi rotor per fasa(ohm)

Z_r : impedansi rotor per fasa(ohm)

R_t : resistansi total motor per fasa(ohm)

X_t : reaktansi total motor per fasa(ohm)

Z_t : impedansi total motor per fasa(ohm)

T : torsi mekanik motor per fasa(Nm)

Tentukan nilai torsi yang paling besar sebagai torsi mekanik maksimum(T_{max}), torsi pada slip beban penuh sebagai torsi mekanik nominal(T_{nom}) dan torsi pada slip=1 sebagai torsi mekanik awal(T_s).

9. Mencari selisih.

Mencari selisih antara R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , dan $|Z_{rn}|$ pada langkah no.7 dengan R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , dan $|Z_{rn}|$ pada langkah no.8 serta mencari selisih antara T_{nom} , T_{max} , dan T_{start} pada langkah no.7 dengan T_{nom} , T_{max} , dan T_{start} pada langkah no.9. Jika selisih dibawah toleransi, maka simpan nilai parameter R_1 , R_2' , R_2'' , X_1 , X_m , X_2' dan X_2'' . Jika selisih masih diluar toleransi yang diijinkan, maka lakukan perubahan nilai parameter dengan memperhatikan Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Pengaruh Perubahan Parameter Terhadap Torsi

Perubahan Nilai Parameter	Efek Perubahan Nilai Parameter Terhadap Besar		
	Torsi Awal	Torsi Maksimum	Torsi Nominal
Menaikkan nilai R_2'	Naik	Turun	Turun
Menurunkan nilai R_2'	Turun	Naik	Naik
Menaikkan nilai R_2''	Naik	Naik	Turun
Menurunkan nilai R_2''	Turun	Turun	Naik
Menaikkan nilai X_2'	Turun	Turun	Turun
Menurunkan nilai X_2'	Naik	Naik	Naik
Menaikkan nilai X_2''	Naik	Turun	Turun
Menurunkan nilai X_2''	Turun	Naik	Naik

Sumber: hasil percobaan

Tabel 2.1 menunjukkan efek perubahan parameter terhadap torsi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda. Lakukan perubahan parameter berurutan dimulai dari R_2' hingga X_2'' sesuai urutan pada Tabel 2.1. setiap perubahan 1 parameter, perbaharui nilai X_m sesuai ketentuan yang telah disebutkan pada langkah no.6. kemudian lakukan langkah no.8 hingga no.12. jika selisihnya masih dibawah toleransi yang ditetapkan, lakukan perubahan pada parameter selanjutnya sesuai Tabel 2.1. ulangi langkah ini selama toleransi belum dipenuhi.

2.3 Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda dengan VSD

Kecepatan motor induksi akan konstan jika dicatu dengan tegangan dan frekuensi yang konstan. Untuk mendapatkan kecepatan yang bervariasi maka perlu adanya alat tambahan yang mampu mengatur besar frekuensi dan tegangan pada catu daya motor. *VSD(Variable Speed Drive)* adalah alat yang mampu mengontrol besarnya tegangan dan frekuensi secara bersamaan untuk mendapatkan kecepatan yang diinginkan dengan efisiensi yang tinggi.

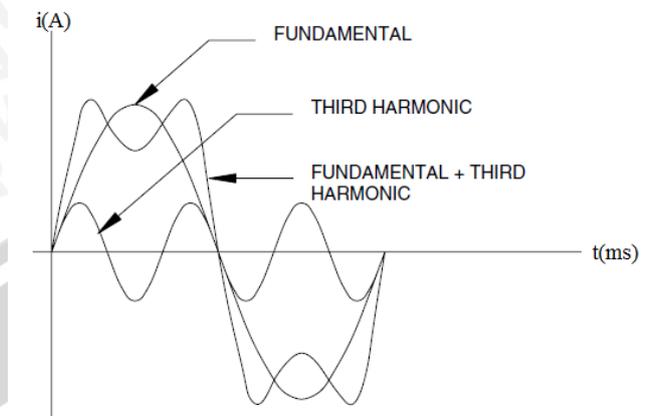
Perubahan frekuensi akan sangat mempengaruhi karakteristik motor. Ketika frekuensi diturunkan, maka nilai reaktansi pada motor akan turun. Hal ini mengakibatkan impedansi pada motor akan turun. Jika impedansi turun maka pada tegangan konstan, arus akan naik. Kenaikan arus yang berlebih akan memicu terjadinya kejenuhan magnetik pada motor dan membahayakan belitan(P.C. Sen, 1997:257). Oleh karena itu ketika frekuensi diturunkan maka tegangan pada catu daya juga diturunkan untuk menghindari hal di atas. Perubahan frekuensi juga akan mengubah kecepatan medan magnet putar pada stator. perubahan medan magnet putar akan mengubah kecepatan rotor.

Untuk mendapatkan efisiensi dan $\cos\phi$ yang tinggi, maka motor harus dioperasikan dibawah slip maksimum. Semakin rendah slip maka efisiensi dan $\cos\phi$ akan semakin tinggi.

2.4 Harmonisa

Harmonisa adalah tegangan atau arus yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Harmonisa muncul akibat penggunaan beban *non-linier* seperti *fast-switching device*, *iron-cored inductors*, *electronic balast*, dan beban *non-linier* lainnya. Jika frekuensi fundamental arus atau tegangan sebesar 50Hz, maka harmonisa ke-2nya memiliki frekuensi sebesar 100Hz, harmonisa ke-3 sebesar 150Hz

dan seterusnya. Pengaruh arus harmonisa ke-3 terhadap arus fundamental ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pengaruh Arus Harmonisa ke-3 Terhadap Arus Fundamental
Sumber: C. Sankaran, 2002:72

Dengan:

i : arus(ampere)

t : waktu(ms)

Gambar 2.5 menggambarkan pengaruh arus harmonisa ke-3 terhadap arus fundamental. Gabungan keduanya merupakan gelombang arus dengan bentuk yang cacat dan tidak berbentuk sinusoida murni lagi.

Untuk mengetahui dampak dari arus harmonisa yang lain terhadap arus fundamental, secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut(C. Sangkaran, 2002:69).

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t + I_3 \sin 3\omega t + \dots + I_n \sin n\omega t \quad (2.51)$$

Dengan:

I_t : arus total(A)

I_0 : arus dc(A)

I_1 : arus fundamental(A)

I_2 : arus harmonisa orde ke-2(A)

I_3 : arus harmonisa orde ke-3(A)

I_n : arus harmonisa orde ke-n(A)

n : orde harmonisa

Besar arus efektif harmonisa bisa didapatkan dengan persamaan berikut(Mack Grady, 2012:17).

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.52)$$

Dengan:

I_{rms} : arus efektif(A)

I_1 : arus fundamental(A)

I_2 : arus harmonisa orde ke-2(A)

I_3 : arus harmonisa orde ke-3(A)

I_n : arus harmonisa orde ke-n(A)

n : orde harmonisa

Harmonisa pada sistem tegangan dan arus tiga fasa diklasifikasikan dengan dua cara. Pertama, harmonisa diklasifikasikan berdasarkan nama dan frekuensinya. Misalnya pada arus atau tegangan fundamental dengan frekuensi 50 Hz, maka harmonisa ke-2 terjadi pada frekuensi 100 Hz, harmonisa ke-3 pada frekuensi 150 Hz, dan seterusnya. Kedua, harmonisa diklasifikasikan berdasarkan arah putaran fasanya. Harmonisa urutan positif(harmonisa ke-4, 7, 10, dst) adalah harmonisa yang memiliki urutan fasa yang sama dengan frekuensi fundamentalnya. Harmonisa urutan negatif(harmonisa ke-2, 5, 8, dst) adalah harmonisa yang memiliki urutan fasa yang berkebalikan dengan urutan fasa frekuensi fundamentalnya. Sedangkan harmonisa urutan nol(harmonisa ke-3, 6, 9, dst) adalah harmonisa yang tidak memiliki perbedaan sudut fasa antara komponen harmonisanya. Karena sifatnya ini, harmonisa urutan nol tidak menghasilkan medan magnet putar pada motor induksi 3 fasa.

2.5 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi dan Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Secara umum ada dua jenis harmonisa yang mempengaruhi kinerja motor induksi, yaitu arus harmonisa waktu dan arus harmonisa ruang. Arus harmonisa waktu muncul akibat catu daya yang mengandung arus harmonisa sehingga medan magnet putar yang tercipta pada celah udara memiliki kecepatan putar yang bervariasi sesuai dengan orde dan urutan harmonisanya. Sedangkan arus harmonisa ruang disebabkan oleh distribusi slot yang terbatas sehingga fluksi yang mengalir pada celah udara memiliki bentuk yang cacat(P.C. Sen, 1997: 270). Pada penelitian ini hanya efek dari arus harmonisa waktu yang akan dibahas.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, arus harmonisa waktu disebabkan oleh arus harmonisa pada sumber yang mencatu terminal motor. Arus harmonisa waktu

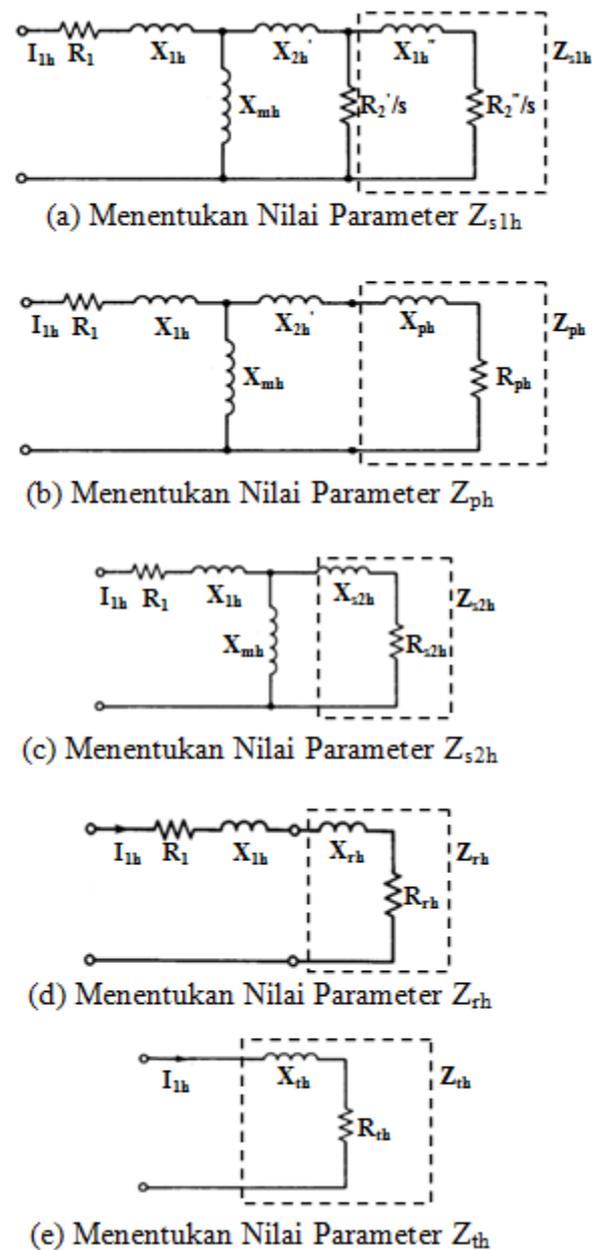
terbagi menjadi arus harmonisa waktu urutan positif, arus harmonisa waktu urutan negatif, dan arus harmonisa waktu urutan nol (P.C. Sen, 1997:272).

Arus harmonisa waktu urutan positif secara umum tidak diinginkan karena mengakibatkan panas yang berlebih pada konduktor dan menyebabkan rugi-rugi tambahan. Arus harmonisa waktu urutan positif juga meningkatkan torsi yang dihasilkan motor induksi 3 fasa karena memiliki arah putaran fasa yang sama dengan frekuensi fundamentalnya sehingga menghasilkan medan magnet putar yang searah dengan medan magnet putar utama. Arus harmonisa waktu urutan positif dihasilkan pada orde ke-1, 4, 7, dst. Walaupun arus harmonisa waktu jenis ini meningkatkan nilai torsi, akan tetapi terjadi peningkatan rugi-rugi pada motor induksi 3 fasa yang cukup signifikan sehingga efisiensi motor menjadi turun.

Arus harmonisa waktu urutan negatif selain menimbulkan rugi-rugi pada konduktor, arus harmonisa waktu urutan ini juga melemahkan medan magnet yang dihasilkan oleh motor sehingga torsi yang dihasilkan juga berkurang. Hal ini karena arah putaran fasa yang dihasilkan berlawanan dengan arah putaran fasa saat frekuensi fundamental. Arus harmonisa waktu urutan ini paling merugikan karena selain mengurangi torsi, arus harmonisa waktu jenis ini juga meningkatkan rugi-rugi. Arus harmonisa waktu urutan negatif dihasilkan pada orde ke-2, 5, 8, dst.

Tidak seperti arus harmonisa waktu urutan positif dan negatif yang saling melemahkan, arus harmonisa waktu urutan nol tidak menghasilkan medan magnet putar pada motor induksi 3 fasa. Distribusi belitan fasa yang seimbang pada motor induksi 3 fasa membuat resultan ggm yang dihasilkan oleh arus harmonisa waktu urutan nol secara vektor selalu bernilai nol untuk setiap slip operasi sehingga tidak ada aliran fluksi pada motor induksi 3 fasa. Pada motor induksi 3 fasa dengan belitan stator yang dihubungkan delta atau bintang tanpa pentanahan, arus harmonisa waktu urutan nol tidak mengalir. Arus harmonisa waktu urutan nol dihasilkan pada orde ke-3, 6, 9, dst. Arus harmonisa waktu urutan ini memiliki karakteristik yang mirip dengan arus gangguan tanah karena tidak memiliki perbedaan fasa antara arus harmonisa waktu yang dihasilkan pada setiap fasanya.

Analisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap motor induksi 3 fasa akan lebih mudah menggunakan rangkaian pengganti 1 fasa. Tahapan mendapatkan rangkaian pengganti 1 fasa untuk menganalisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda ditunjukkan Gambar 2.6 sebagai berikut.



Gambar 2.6 Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu

Sumber: P.C. Sen, 1997:274

Dengan:

h : orde AHW

I_{1h} : arus pada stator per fasa pada AHW ke- h (ampere)

R_1 : resistansi stator per fasa(ohm)

X_{1h} : reaktansi bocor stator per fasa pada AHW ke- h (ohm)

X_{mh} : reaktansi magnetik stator per fasa pada AHW ke- h (ohm)

R_2' : resistansi rotor lapisan luar per fasa(ohm)

R_2'' : resistansi rotor lapisan dalam per fasa(ohm)

$X_{2'h}$: reaktansi bocor rotor lapisan luar per fasa pada AHW ke- h (ohm)

X_{2h}'' : reaktansi bocor rotor lapisan dalam per fasa pada AHW ke-h(ohm)

R_{ph} : resistansi pada impedansi Z_{ph} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

X_{ph} : reaktansi pada impedansi Z_{ph} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

Z_p : impedansi paralel antara R_{2h}'' dan Z_{s1h} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

Z_{s1} : impedansi rotor lapisan dalam per fasa pada AHW ke-h(ohm)

R_{s2h} : resistansi pada impedansi Z_{s2h} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

X_{s2h} : reaktansi pada impedansi Z_{s2h} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

Z_{s2h} : impedansi rotor sebelum diparalel dengan X_{mh} per fasa pada AHW ke-h(ohm)

R_{rh} : resistansi rotor per fasa pada AHW ke-h(ohm)

X_{rh} : reaktansi rotor per fasa pada AHW ke-h(ohm)

Z_{rh} : impedansi rotor per fasa pada AHW ke-h (ohm)

R_{th} : resistansi total motor per fasa pada AHW ke-h(ohm)

X_{th} : reaktansi total motor per fasa pada AHW ke-h(ohm)

Z_{th} : impedansi total motor per fasa pada AHW ke-h(ohm)

sh : slip saat AHW ke-h

Gambar 2.6 menunjukkan rangkaian pengganti 1 fasa pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang digunakan ketika sumber mengandung arus AHW waktu. Secara matematis parameter-parameter di atas didapatkan dari persamaan 2.53 hingga 2.63.

$$X_{1h} = \frac{f_h}{f} X_1 \quad (2.53)$$

$$X'_{2h} = \frac{f_h}{f} X'_2 \quad (2.54)$$

$$X''_{2h} = \frac{f_h}{f} X''_2 \quad (2.55)$$

$$X_m = \frac{f_h}{f} X_m \quad (2.56)$$

$$n_{sh} = \frac{120f_h}{P} \quad (2.57)$$

$$s_h = \frac{n_{sh} - n_{rh}}{n_{sh}} \quad (2.58)$$

$$Z_{s1h} = \frac{R_2''}{s} + jX_{2h}'' \quad (2.59)$$

$$Z_{ph} = \frac{\frac{R'_{2h} Z_{s1h}}{s}}{\frac{R'_{2h}}{s} + Z_{s1h}} = R_{ph} + jX_{ph} \quad (2.60)$$

$$Z_{s2h} = Z_{ph} + jX'_{2h} = R_{ph} + jX_{ph} \quad (2.61)$$

$$Z_{rh} = \frac{jX_{mh}Z_{s1h}}{jX_{mh}+Z_{s1h}} = R_{rh} + jX_{rh} \quad (2.62)$$

$$Z_{th} = (R_1 + R_{rh}) + j(X_1 + X_{rh}) = R_{th} + jX_{th} \quad (2.63)$$

Dengan:

h : orde AHW

f_h : frekuensi AHW ke-h(Hz)

f : frekuensi saat nilai reaktansi diketahui(Hz)

X_1 : reaktansi stator saat frekuensi f(Hz)

X_2' : reaktansi rotor lapisan luar saat frekuensi f(Hz)

X_2'' : reaktansi rotor lapisan dalam saat frekuensi f(Hz)

X_m : reaktansi magnetik saat frekuensi f(Hz)

X_{1h} : reaktansi stator saat frekuensi f_h (Hz)

X_{2h}' : reaktansi rotor lapisan luar saat frekuensi f_h (Hz)

X_{2h}'' : reaktansi rotor lapisan dalam saat frekuensi f_h (Hz)

X_{mh} : reaktansi magnetik saat frekuensi f_h (Hz)

n_{rh} : kecepatan rotor saat dipengaruhi AHW(rpm)

n_{sh} : kecepatan sinkron saat AHW ke-h(rpm)

P : jumlah kutub motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

Kecepatan sinkron saat AHW urutan negatif akan bernilai negatif karena memiliki putaran yang berlawanan dengan putaran medan magnet putar fundamentalnya. Sedangkan saat AHW urutan nol, nilai dari kecepatan sinkron adalah nol.

2.5.1 Analisis Torsi pada Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Torsi pada motor induksi 3 fasa umumnya ada 2 jenis yaitu torsi mekanik dan torsi beban. Torsi mekanik merupakan torsi yang terjadi pada poros rotor sebelum dikurangi rugi gesekan, angin dan inti besi. Sedangkan torsi beban adalah torsi pada poros rotor. biasanya pada *datasheet* yang dikeluarkan oleh pabrikan motor, dicantumkan torsi beban motor untuk kondisi awal, nominal dan beban maksimum. Hampir semua buku referensi mengabaikan nilai rugi stray dalam perhitungan nilai torsi mekanik karena nilainya yang relatif kecil dan mengikuti standar *IEC* yang tidak menghitung nilai rugi *stray*.

2.5.1.1 Analisis Torsi Mekanik

Torsi mekanik motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda akan mengalami perubahan akibat munculnya arus harmonisa waktu. Arus Harmonisa waktu urutan

positif menghasilkan torsi positif, sedangkan arus harmonisa waktu urutan negatif menghasilkan torsi negatif. Secara matematis besar torsi mekanik saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu dituliskan seperti persamaan 2.64 dan 2.65(P.C. Sen 1997:275).

$$T_h = 9,55 \frac{3I_{1h}^2 R_{rh}}{n_{sh}} \quad (2.64)$$

$$T_{th} = \sum_{n=1}^{\infty} T_h \quad (2.65)$$

Dengan:

h : orde AHW urutan positif dan negatif

T_h : torsi mekanik motor akibat arus harmonisa waktu ke-h(Nm)

T_{th} : total torsi mekanik motor akibat arus harmonisa waktu(Nm)

I_{1h} : arus stator saat orde AHW ke-h(A)

R_{rh} : resistansi rotor saat orde AHW ke-h(ohm)

n_{sh} : kecepatan sinkron saat orde AHW ke-h(rpm)

Untuk menganalisis torsi mekanik motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda tanpa pengaruh arus harmonisa waktu dan gunakan persamaan 2.66.

$$T = 9,55 \frac{I_{rms}^2 R_{r1}}{n_{s1}} \quad (2.66)$$

Dengan:

T : torsi mekanik motor tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(Nm)

I_{rms} : arus efektif dari arus harmonisa waktu yang mengalir pada stator(ampere)

R_{r1} : resistansi rotor saat orde AHW ke-1(ohm)

n_{s1} : kecepatan sinkron saat orde AHW ke-1(rpm)

2.5.1.2 Analisis Torsi Beban

Selain torsi mekanik, torsi beban motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda juga dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu. Torsi beban dari motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$T_{nh} = T_h - T_{roth} \quad (2.67)$$

$$T_{nth} = \sum_{h=1}^{h=\infty} T_{nh} \quad (2.68)$$

Dengan:

h : orde AHW

T_{nh} : torsi beban saat orde AHW ke-h(Nm)

T_{nth} : torsi beban total akibat arus harmonisa waktu(Nm)

T_{roth} : rugi torsi mekanik akibat rugi gesekan, angin, dan inti saat

AHW ke-h(Nm)

Besar rugi torsi mekanik yang muncul karena rugi gesekan, angin, dan inti besi ikut berubah akibat arus harmonisa waktu. Perubahan rugi-rugi gesekan, angin dan inti besi sangat dipengaruhi oleh perubahan daya masukan motor (Daut K, dkk, 2009:12-B). Secara matematis rugi-rugi gesekan, angin dan inti besi ditulis sebagai berikut:

$$P_{f+w+rc h} = 3,5\%P_{inh} \quad (2.69)$$

Dengan:

h : orde AHW

$P_{f+w+rc h}$: rugi-rugi gesekan, angin, dan inti besi pada AHW ke-h(W)

P_{inh} : daya masukan pada AHW ke-h(W)

Karena rugi-rugi gesekan, angin dan inti besi sangat dipengaruhi oleh daya masukan motor, maka besar daya masukan harus dianalisis. Besar dari daya masukan akibat arus harmonisa waktu secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$P_{inh} = 3I_{1h}^2 \cdot R_{th} \quad (2.70)$$

$$P_{inth} = \sum_{h=1}^{\infty} P_{inh} \quad (2.71)$$

Dengan:

h : orde AHW positif dan negatif

P_{inh} : daya masukan akibat arus harmonisa waktu ke-h(W)

P_{inth} : daya masukan total akibat arus harmonisa waktu(W)

I_{1h} : arus pada stator per fasa pada orde AHW ke-h(ampere)

R_{th} : resistansi total motor per fasa pada orde AHW ke-h(ohm)

Pada arus harmonisa waktu urutan nol, medan magnet putar tidak terbentuk karena secara vektor besar ggm pada celah udara sama dengan nol untuk setiap waktu operasi. Sehingga hanya parameter-parameter stator yang muncul saat arus harmonisa waktu urutan nol mengalir. Oleh karena itu, resistansi total motor sama dengan resistansi stator. Selain itu hal ini juga menyebabkan tidak munculnya nilai rugi gesekan, angin dan inti besi.

Besar daya masukan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu secara matematis dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$P_{inwh} = 3I_{rms}^2 R_{t1} \quad (2.72)$$

Dengan:

P_{inwh} : daya masukan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(watt)

I_{rms} : arus efektif dari arus-arus harmonisa waktu(A)

R_{tl} : resistansi total motor saat orde AHW ke-1(ohm)

Besar rugi gesekan, angin dan inti besi saat tidak ada arus harmonisa waktu secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$P_{f+w+rcwh} = 3,5\%P_{inwh} \quad (2.73)$$

Dengan:

$P_{f+w+rcwh}$: rugi-rugi gesekan, angin, dan inti besi pada tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(W)

P_{inwh} : daya masukan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(W)

Setelah semua rugi diketahui, maka besar besar torsi yang hilang akibat rugi gesekan, angin, dan inti besi akibat arus harmonisa waktu secara matematis dijelaskan dengan persamaan berikut.

$$T_{roth} = 9,55 \frac{P_{f+w+rcwh}}{n_{rh}} \quad (2.74)$$

Dengan:

h : orde AHW

n_{rh} : kecepatan putar rotor akibat pengaruh arus harmonisa waktu(rpm)

$P_{f+w+rcwh}$: rugi-rugi gesekan, angin, dan inti besi pada AHW ke-h(W)

T_{roth} : rugi torsi mekanik akibat rugi gesekan, angin, inti besi dan *stray* saat arus harmonisa waktu ke-h(Nm)

Ketika tidak dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu, persamaan matematis rugi torsi rotasional menjadi seperti berikut.

$$T_{rotwh} = 9,55 \frac{P_{f+w+rcwh}}{n_{rh}} \quad (2.75)$$

Dengan:

T_{rotwh} : torsi mekanik akibat rugi gesekan, angin, inti besi dan *stray* tanpa pengaruh AHW (Nm)

Torsi beban tanpa pengaruh arus harmonisa waktu secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$T_n = T - T_{rotwh} \quad (2.76)$$

Dengan:

T_n : torsi beban tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(Nm)

T : torsi mekanik tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(Nm)

2.5.2 Analisis Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Untuk menganalisis nilai efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda akibat pengaruh arus harmonisa waktu secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\eta_h = \frac{P_{outth}}{P_{inth}} \times 100\% \quad (2.77)$$

Dengan:

η_h : efisiensi motor akibat adanya arus harmonisa waktu(%)

P_{inth} : daya masukan total akibat adanya arus harmonisa waktu (W)

P_{outth} : daya keluaran total akibat adanya arus harmonisa waktu (W)

Total daya keluaran akibat arus harmonisa waktu secara matematis ditulis sebagai berikut:

$$P_{outth} = \frac{T_{nth} \cdot n_{rh}}{9,55} \quad (2.78)$$

Dengan:

n_{rh} : kecepatan putar rotor akibat pengaruh AHW(rpm)

T_{th} : total torsi mekanik motor akibat arus harmonisa waktu (Nm)

P_{outth} : total daya keluaran akibat adanya arus harmonisa waktu (W)

Dengan mengasumsikan bahwa ketika tidak ada arus harmonisa waktu, nilai arus efektif yang mencatu motor sama dengan nilai arus efektif arus-arusa harmonisa dengan kecepatan rotor yang sama. Secara matematis besar efisiensi dan daya keluaran dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.

$$\eta_{wh} = \frac{P_{outwh}}{P_{inwh}} \times 100\% \quad (2.79)$$

$$P_{outwh} = \frac{T_n \cdot n_{rh}}{9,55} \quad (2.80)$$

Dengan:

η_h : efisiensi motor tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(%)

P_{inth} : daya masukan total tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(W)

n_{rh} : kecepatan putar rotor akibat pengaruh arus harmonisa waktu(rpm)

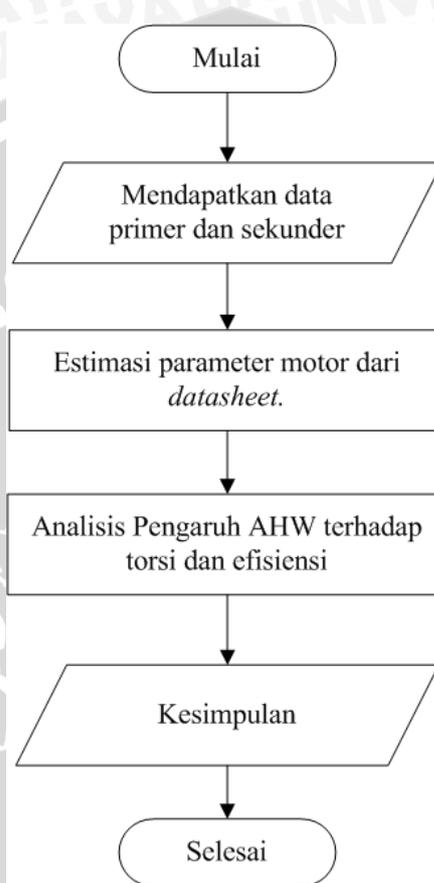
T_n : total torsi mekanik motor tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(Nm)

P_{outwh} : total daya keluaran tanpa pengaruh arus harmonisa waktu(W)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur. PT. YTL Jawa timur merupakan perusahaan multinasional yang memiliki unit 5 dan 6 di PLTU Paiton, Probolinggo. Unit 5 dan 6 masing-masing memiliki *reclaimer* batu bara yang bertugas mengatur batu bara di penyimpanan. Setiap *reclaimer* batu bara memiliki *travelling system* yang digerakkan oleh sembilan motor induksi 3 fasa yang dicatu oleh *variable speed drive(VSD)*. Penelitian ini menjadikan salah satu motor induksi 3 fasa pada *reclaimer travelling system* di unit 5 sebagai objek penelitian khususnya tentang pengaruh arus harmonisa waktu(AHW) terhadap torsi dan efisiensinya.

3.3 Pengambilan Data

Penelitian ini menggunakan 2 jenis data seperti dijelaskan di bawah ini.

3.3.1 Data Primer

Pengambilan data primer dilakukan dengan *power quality analyser* 434/435 dan *non-contact tachometer grainger 5URH0*. *Power quality analyser* 434/435 digunakan untuk mengambil data tentang arus harmonisa waktu pada terminal motor induksi 3 fasa penggerak *reclaimer travelling system*. *non-contact tachometer grainger 5URH0* digunakan untuk mengukur kecepatan rotor motor induksi 3 fasa penggerak *reclaimer travelling system* saat beroperasi.

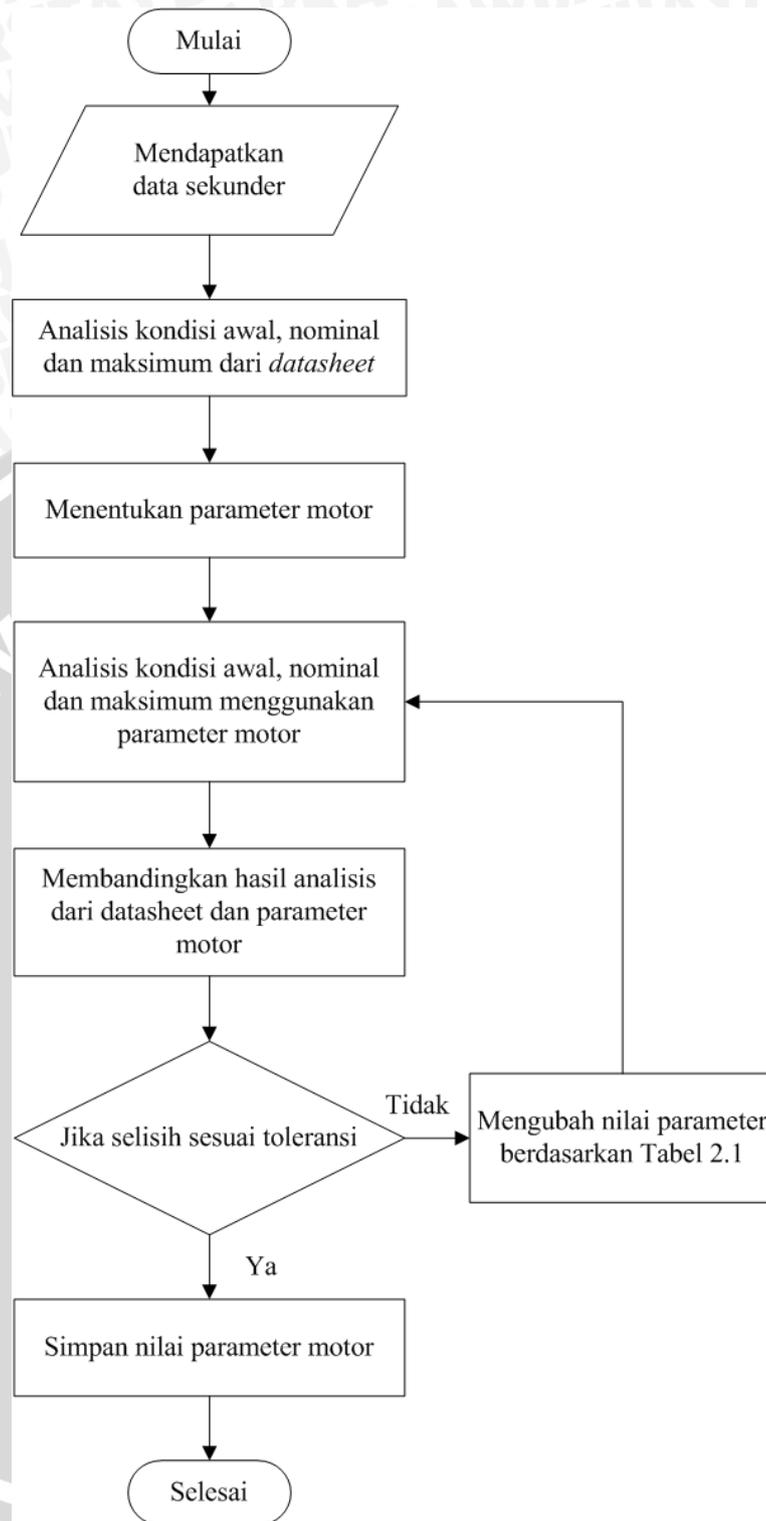
3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder tentang motor induksi 3 fasa penggerak *reclaimer travelling system* diambil dari *datasheet* motor VEM K11R 160 L6 yang disediakan oleh ruang dokumen milik PT. YTL Jawa Timur. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain: tegangan terminal stator, arus nominal, efisiensi, kecepatan rotor, kecepatan sinkron, dan daya keluaran.

3.4 Estimasi Parameter Motor dari *Datasheet*

Data-data yang telah didapatkan sebelumnya dianalisis untuk mengestimasi parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda penggerak *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur. Parameter-parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda hasil estimasi nantinya akan digunakan lebih lanjut dalam tahap analisis dampak arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor. Parameter-parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang akan diestimasi nilainya melalui proses analisis antara lain: resistansi rotor lapisan dalam, resistansi rotor lapisan luar, resistansi stator, reaktansi rotor lapisan dalam, reaktansi rotor bagian luar, reaktansi stator dan reaktansi magnetik.

Estimasi nilai parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda menggunakan standar *IEEE* 112. Sehingga rugi *stray* juga diperhitungkan dalam proses analisis. Toleransi kesalahan yang dipakai dalam proses estimasi ini adalah sebesar 0,5%. Dengan nilai toleransi yang kecil seperti ini, diharapkan hasil yang didapatkan lebih akurat. Diagram alir estimasi parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Estimasi Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Data sekunder yang diperlukan antara lain: tegangan terminal, arus nominal, slip nominal, arus awal, torsi beban awal, torsi beban nominal dan torsi beban maksimum. Semua data di atas didapatkan dari *datasheet*. Analisis motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat kondisi awal digunakan untuk mendapatkan torsi mekanik awal serta

nilai impedansi total rotor saat kondisi awal. Impedansi rotor saat kondisi awal merupakan penjumlahan vektor antara resistansi dan reaktansi rotor saat kondisi awal. Begitu juga analisis saat kondisi nominal, analisis ini digunakan untuk mendapatkan besar torsi mekanik nominal dan nilai impedansi total rotor saat motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda bekerja dengan beban nominal. Impedansi rotor saat kondisi nominal merupakan penjumlahan vektor dari resistansi dan reaktansi rotor saat kondisi nominal. Sedangkan analisis saat kondisi maksimum hanya untuk mendapatkan torsi maksimum dari motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

Ketiga jenis analisis di atas dapat dilakukan dengan dua cara berbeda. Pertama menggunakan data-data yang tertera pada *datasheet* seperti yang telah di jelaskan pada sub bab 2.1 pada langkah ke-1 hingga langkah ke-5. Kedua menggunakan parameter-parameter pada rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi tiga fasa seperti yang ditunjukkan pada sub bab 2.1 pada langkah ke-6 hingga langkah ke-9.

Hasil analisis dari cara pertama dijadikan sebagai nilai referensi. Jika selisih hasil analisis antara cara pertama dan kedua masih di atas toleransi yang diijinkan, maka nilai parameter-parameter pada rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi tiga fasa kecuali resistansi dan reaktansi stator harus diubah berdasarkan Tabel 2.1. Setelah itu melakukan analisis ulang menggunakan cara kedua dan melakukan perbandingan ulang dengan nilai referensi. Lakukan hal ini hingga selisih antara hasil cara pertama dan kedua di bawah toleransi.

3.5 Analisis Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi dan Efisiensi

Arus harmonisa waktu yang telah diukur kemudian dianalisis dengan bantuan MATLAB 2010 untuk mengetahui dampaknya terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda pada *reclaimer travelling system*.

3.6 Menarik Kesimpulan

Dari hasil analisis di atas ditarik kesimpulan untuk dapat mengetahui secara jelas pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda penggerak *reclaimer travelling system*.

BAB IV

ANALISIS PENGARUH ARUS HARMONISA WAKTU TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA

4.1 Estimasi Parameter Motor Induksi Tiga Fasa VEM K11R 160 L6

Terminal motor VEM K11R 160 L6 yang digunakan sebagai penggerak *reclaimer travelling system* pada PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur dihubungkan bintang dengan netral ditanahkan. Untuk mengetahui kelas dari motor VEM K11R 160 L6, lakukan perbandingan antara karakteristik torsi motor VEM K11R 160 L6 dengan standar perancangan motor induksi 3 fasa milik NEMA.

Motor VEM K11R 160 L6 memiliki torsi beban awal sebesar 2 kali torsi beban nominal dengan arus awal sebesar 5 kali arus nominal. Besar torsi beban maksimum 2,3 kali torsi beban nominal. Maka dapat disimpulkan motor menggunakan desain motor induksi 3 fasa kelas C milik *NEMA* (motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda).

Berdasarkan *datasheet* motor VEM K11R 160 L6 didapatkan data-data sebagai berikut (Ruang Dokumen PT. YTL Jawa Timur, 2014):

V_n	= 400	volt
I_n	= 22	ampere
η	= 85	%
n_r	= 965	rpm
n_s	= 1000	rpm
P_{out}	= 11.000	watt
Pole	= 6	

Berikut langkah-langkah menentukan parameter motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dari *datasheet*.

1. Menentukan besar slip, P_{in} , P_{f+w+rc} , P_{stray} , P_{conv} , P_{RCL} , P_{AG} , P_{SCL} , T_{mek} , T_n , R_1 , dan T_{loss} .

Dari data di atas, nilai slip dan daya masukan (P_{in}), dapat dicari menggunakan persamaan 2.6 dan 2.5 :

$$s = \frac{1.000 - 965}{1.000} = 0,035$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{11.000}{85\%} = 12.941,18 \text{ watt}$$

Nilai dari rugi-rugi gesekan, rugi-rugi inti besi, dan rugi *stray* dapat ditemukan berdasarkan persamaan 2.7 dan 2.8.

$$P_{f+w+rc} = 3,5\% \cdot P_{in} = 3,5\% \times 12.941,18 = 452,9412 \text{ watt}$$

$$P_{stray} = 1,8\% \cdot P_{out} = 1,8\% \times 11.000 = 198 \text{ watt}$$

Setelah besar nilai P_{f+w+rc} , dan P_{stray} ditemukan, maka besar daya mekanik, daya celah udara, rugi tembaga stator dan rugi tembaga rotor dapat dicari dengan persamaan 2.9 hingga 2.12.

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{out} + P_{stray} + P_{f+w+rc} \\ &= 11.000 + 198 + 452,941 = 11.650,94 \text{ watt} \end{aligned}$$

$$P_{AG} = \frac{P_{conv}}{1-s} = \frac{11.650,94}{1-0,035} = 12.073,51 \text{ watt}$$

$$P_{SCL} = P_{in} - P_{AG} = 12.941,18 - 12.073,51 = 867,6623 \text{ watt}$$

$$P_{RCL} = P_{AG} - P_{conv} = 12.073,51 - 11.650,94 = 452,9412 \text{ watt}$$

Setelah mengetahui semua parameter di atas, analisis selanjutnya akan dilakukan berdasarkan rangkaian pengganti satu fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda. Oleh karena itu, perhitungan parameter-parameter motor selanjutnya akan dilakukan per fasa. Besar resistansi stator, torsi mekanik nominal dan torsi beban nominal per fasa dapat dihitung sebagai berikut berdasarkan persamaan 2.13, 2.14 dan 2.16.

$$T_{mek} = 9,55 \frac{P_{ag}}{3n_s} = 9,55 \frac{12.073,51}{3 \times 1000} = 38,434 \text{ Nm}$$

$$T_n = 9,55 \frac{P_{out}}{3n_r} = \frac{11.000}{3 \times 965} = 36,2867 \text{ Nm}$$

$$R_1 = \frac{\left(\frac{P_{SCL}}{3}\right)}{I_1^2} = \frac{867,6623/3}{22^2} = 0,5975 \text{ ohm}$$

Karena P_{stay} dan P_{f+w+rc} konstan untuk semua slip operasi, maka torsi mekanik yang hilang akibat rugi-rugi ini juga konstan. Berdasarkan persamaan 2.15, dapat dituliskan sebagai berikut.

$$T_{loss} = T_{mek} - T_n = 38,434 - 36,2867 = 2,1473 \text{ Nm}$$

2. Analisis kondisi awal.

Menganalisis kondisi awal pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda, lakukan analisis nilai torsi mekanik awal dan arus awal menggunakan persamaan 2.23 dan 2.24.

$$I_s = k_{is} \cdot I_n = 5 \times 22 = 110 \text{ ampere}$$

$$T_s = (k_{ts} \cdot T_n) + T_{loss} = (2 \times 36,2867) + 2,1473 = 74,7207 \text{ Nm}$$

Selanjutnya besar tegangan pada terminal motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat kondisi awal dapat dicari menggunakan persamaan 2.1.

$$V_1 = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,9401077 \text{ volt}$$

Dapatkan nilai parameter Z_{ts} , R_{rs} , R_{ts} , dan X_{ts} menggunakan persamaan 2.26 hingga 2.29.

$$|Z_{ts}| = \left| \frac{V_1}{I_s} \right| = \left| \frac{230,9401077}{110} \right| = 2,099456 \text{ ohm}$$

$$R_{rs} = 0,1047 \frac{T_s \times n_s}{I_s^2} = 0,1047 \frac{74,7207 \times 1000}{110^2} = 0,6465 \text{ ohm.}$$

$$R_{ts} = R_1 + R_{rs} = 0,59756 + 0,64655 = 1,24411 \text{ ohm}$$

$$X_{ts} = \sqrt{|Z_{ts}|^2 - R_{ts}^2} = \sqrt{2,099456^2 - 1,24411^2} = 1,69112 \text{ ohm}$$

Hubungan X_1 dan X_{ts} berdasarkan standar *IEEE* 112 yang tertulis pada persamaan 2.25 adalah sebagai berikut:

$$X_1 = 0,3 \cdot X_{ts} = 0,3 \times 1,69112 = 0,507337 \text{ ohm}$$

Kemudian dapatkan nilai parameter X_{rs} dan Z_{rs} menggunakan persamaan 2.30 dan 2.31.

$$X_{rs} = X_{ts} - X_1 = 1,69112 - 0,507337 = 1,183785 \text{ ohm}$$

$$|Z_{rs}| = \sqrt{R_{rs}^2 + X_{rs}^2} = \sqrt{0,6465^2 + 1,183785^2} = 1,359990159 \text{ ohm.}$$

3. Analisis konsisi nominal.

Analisis motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat beban nominal dilakukan dengan menghitung parameter R_{rn} , R_{tn} , $|Z_{tn}|$, X_{tn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, dan $\cos\phi$ menggunakan persamaan 2.32 hingga 2.38.

$$R_{rn} = \frac{P_{AG}}{3I_n^2} = \frac{12.073,51}{3 \times 22^2} = 8,315092 \text{ ohm.}$$

$$R_{tn} = R_{rn} + R_1 = 8,315092 + 0,597564 = 8,912656 \text{ ohm}$$

$$|Z_{tn}| = \left| \frac{V_1}{I_n} \right| = \left| \frac{230,9401077}{22} \right| = 10,49727762 \text{ ohm}$$

$$X_{tn} = \sqrt{|Z_{tn}|^2 - R_{tn}^2} = \sqrt{10,49727762^2 - 8,912656^2} = 5,545936 \text{ ohm}$$

$$X_{rn} = X_{tn} - X_1 = 5,545936 - 0,507337 = 5,038599 \text{ ohm}$$

$$|Z_{rn}| = \sqrt{R_{rn}^2 + X_{rn}^2} = \sqrt{8,912656^2 + 5,038599^2} = 9,722563 \text{ ohm}$$

$$\cos\phi = \tan^{-1} \frac{X_{tn}}{R_{tn}} = \tan^{-1} \frac{5,545936}{8,912656} = 0,849044514$$

4. Analisis torsi maksimum.

Torsi mekanik maksimum motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda didapatkan dari persamaan 2.39.

$$T_{max} = (2,3 \cdot T_n) + T_{loss} = (2,3 \times 36,2867) + 2,1473 = 85,6067 \text{ Nm}$$

5. Menentukan nilai awal untuk parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' .

Penentuan nilai awal untuk parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' harus memperhatikan syarat-syarat yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 2.2 poin 6. Nilai awal parameter ditentukan sebagai berikut.

$$R_2' = 0,8 \quad \text{ohm}$$

$$R_2'' = 0,7 \quad \text{ohm}$$

$$X_m = 1 \quad \text{ohm}$$

$$X_2' = 1,014 \quad \text{ohm}$$

$$X_2'' = 2,028 \quad \text{ohm}$$

Setelah memberi nilai awal untuk tiap-tiap parameter, lakukan koreksi nilai X_m dengan memperhatikan parameter Q_{in} , E , I_{s2} , Q_m , I_m saat kondisi beban penuh menggunakan persamaan 2.40 hingga 2.44.

$$Q_{in} = \frac{P_{in}}{3 \cdot \cos \varphi} \sin(\cos^{-1}(\cos \varphi)) = 8052,698 \text{ var}$$

$$E = I_n \cdot |Z_{rn}| = 22 \times 9,722563 = 213,8964 \text{ volt}$$

Lakukan persamaan 2.18 hingga 2.20 menggunakan nilai awal R_2' , R_2'' , X_2' , dan X_2'' untuk mendapatkan parameter R_{s2} dan X_{s2} saat beban nominal. Kemudian hitung nilai I_{s2} dengan persamaan 2.42.

$$Z_{s1} = \frac{R_2''}{s} + jX_2'' = \frac{0,7}{0,035} + j2,028 \text{ ohm}$$

$$Z_p = \frac{\frac{R_2'}{s} \cdot Z_{s1}}{\frac{R_2'}{s} + Z_{s1}} = R_p + jX_p$$

$$= \frac{\frac{0,8}{0,035} \cdot (\frac{0,7}{0,035} + j2,028)}{\frac{0,8}{0,035} + \frac{0,7}{0,035} + j2,028} = 10,6939 + j0,5759 \text{ ohm}$$

$$Z_{s2} = Z_p + jX_2' = 10,6939 + j0,5759 + j1,014 = 10,6939 + j1,5906 \text{ ohm}$$

$$I_{s2} = \frac{|E|}{\sqrt{R_{s2}^2 + X_{s2}^2}} = \frac{213,8964}{\sqrt{10,6939^2 + 1,5906^2}} = 19,784 \text{ ampere}$$

Selanjutnya dapatkan nilai Q_m dan I_m menggunakan persamaan 2.43 dan 2.42 sebagai berikut.

$$Q_m = Q_{in} - I_n^2 X_1 - I_{s2}^2 X_{s2}$$

$$= 8052,698 - (22^2 \cdot 0,507335) - (19,784^2 \cdot 1,5906) = 1816,103 \text{ var}$$

$$I_m = \frac{|E|}{X_m} = \frac{213,8964}{1} = 213,8964 \text{ ampere}$$

Jika nilai awal X_m pada disebut A, maka nilai X_m pada perhitungan menggunakan persamaan 2.45 di bawah ini disebut B.

$$B = X_m = \frac{Q_m}{I_m^2} = \frac{1816,103}{213,8964^2} = 0,039695 \text{ ohm}$$

Karena nilai $A > B$, maka berdasarkan aturan tentang penentuan X_m yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 2.2, naikkan nilai A. Setelah nilai A dinaikkan, jadikan nilai A sebagai pengganti nilai awal X_m . Dengan bantuan program seperti Ms. Excel atau sejenisnya ulangi langkah ke-5 tentang koreksi nilai X_m . jika nilai $A \approx B$, maka hentikan perhitungan dan masukkan nilai A sebagai pengganti nilai awal X_m .

Pada kasus ini, setelah melalui proses perulangan yang panjang di dapatkan nilai A dan B sebagai berikut:

$$A = 25,193 \text{ ohm}$$

$$B = 25,199 \text{ ohm}$$

Maka, nilai awal X_m sebesar 25,193 ohm.

6. Menentukan nilai referensi

Menjadikan nilai R_{rs} , X_{rs} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s yang telah dihitung pada langkah ke-1 hingga langkah ke-5 sebagai referensi. Nilai referensi ini nantinya akan dijadikan acuan terhadap nilai parameter baru yang didapatkan dari estimasi parameter motor. Toleransi kesalahan yang diijinkan sebesar 0,5%. Dengan nilai toleransi yang kecil ini diharapkan hasil estimasi yang didapatkan menjadi lebih akurat. Tabel 4.1 menunjukkan parameter-parameter yang dijadikan referensi.

Tabel 4.1 Parameter Referensi

Parameter	Nilai Referensi
R_{rs}	0,64655 Ω
X_{rs}	1,83785 Ω
$ Z_{rs} $	1,34884 Ω
R_{rn}	8,31509 Ω
X_{rn}	5,03859 Ω
$ Z_{rn} $	9,72256 Ω
T_s	74,72072 Nm
T_{mek}	38,43402 Nm
T_{max}	85,60673 Nm

Tabel 4.1 menunjukkan parameter-parameter dari motor induksi 3 fasa yang diperoleh dari *datasheet* dan akan dijadikan sebagai referensi dalam analisis berikutnya.

7. Analisis parameter rotor dan torsi menggunakan estimasi nilai parameter.

Menghitung kembali nilai R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , dan $|Z_{rn}|$ menggunakan parameter R_1 , X_1 serta nilai awal parameter R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' . Gunakan persamaan 2.17 hingga 2.21 untuk mencari parameter R_{rs} , X_{rx} dan Z_{rs} .

$$s = 1$$

$$Z_{s1} = \frac{R_2''}{s} + jX_2'' = \frac{0,7}{1} + j2,028 \text{ ohm}$$

$$Z_p = \frac{\frac{R_2' \cdot Z_{s1}}{s}}{\frac{R_2'}{s} + Z_{s1}} = R_p + jX_p = \frac{\frac{0,8 \cdot (0,7 + j2,028)}{1}}{\frac{0,8}{1} + \frac{0,7}{1} + j2,028} = 0,64925 + j0,20394 \text{ ohm}$$

$$\begin{aligned} Z_{s2} &= Z_p + jX_2' = R_{s2} + jX_{s2} \\ &= 0,64925 + j0,20394 + j1,014 = 0,64925 + j1,21869 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{rs} &= \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_{rs} + jX_{rs} \\ &= \frac{j25,193 \cdot (0,64925 + j1,21869)}{0,64925 + j1,21869 + j25,193} = 0,59036 + j1,76905 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Nilai $|Z_{rs}|$ didapatkan dengan memasukkan nilai R_{rs} dan X_{rs} yang didapatkan pada persamaan 2.21 kedalam persamaan 2.31.

$$|Z_{rs}| = \sqrt{R_{rs}^2 + X_{rs}^2} = \sqrt{0,59036^2 + 1,76905^2} = 1,816677 \text{ ohm}$$

Gunakan persamaan 2.18 hingga 2.20 dilanjutkan dengan persamaan 2.46 dan 2.37 untuk mencari nilai R_{rn} , X_{rn} , dan $|Z_{rn}|$.

$$s = 0,035$$

$$Z_{s1} = \frac{R_2''}{s} + jX_2'' = \frac{0,7}{0,035} + j2,028 \text{ ohm}$$

$$Z_p = \frac{\frac{R_2' \cdot Z_{s1}}{s}}{\frac{R_2'}{s} + Z_{s1}} = R_p + jX_p = \frac{\frac{0,8 \cdot (\frac{0,7}{0,035} + j2,028)}{0,035}}{\frac{0,8}{0,035} + \frac{0,7}{0,035} + j2,028} = 10,6939 + j0,5759 \text{ ohm}$$

$$\begin{aligned} Z_{s2} &= Z_p + jX_2' = R_{s2} + jX_{s2} \\ &= 10,6939 + j0,5759 + j1,014 = 10,6939 + j1,5906 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{rn} &= \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_{rn} + jX_{rn} \\ &= \frac{j25,193 \cdot (10,6939 + j1,5906)}{10,6939 + j1,5906 + j25,193} = 8,1605 + j4,7544 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$|Z_{rn}| = \sqrt{R_{rn}^2 + X_{rn}^2} = \sqrt{8,1605^2 + 4,7544^2} = 9,44452 \text{ ohm}$$

8. Analisis torsi untuk berbagai slip operasi.

Lakukan analisis torsi untuk slip operasi 1 hingga 0 dengan interval 0,01 dengan menggunakan persamaan 2.18 hingga 2.20 dilanjutkan dengan persamaan 2.47 hingga 2.50.

$$s = 1$$

$$\begin{aligned} Z_{s1} &= \frac{R_2''}{s} + jX_2'' \\ &= \frac{0,7}{1} + j2,028 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{\frac{R_2' \cdot Z_{s1}}{s}}{\frac{R_2'}{s} + Z_{s1}} = R_p + jX_p \\ &= \frac{\frac{0,8 \cdot (0,7 + j2,028)}{1}}{\frac{0,8}{1} + \frac{0,7}{1} + j2,028} = 0,64925 + j0,20394 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{s2} &= Z_p + jX_2' = R_{s2} + jX_{s2} \\ &= 0,64925 + j0,20394 + j1,014 = 0,64925 + j1,21869 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_r &= \frac{jX_m \cdot Z_{s2}}{Z_{s2} + jX_m} = R_r + jX_r \\ &= \frac{j25,193 \cdot (0,64925 + j1,21869)}{0,64925 + j1,21869 + j25,193} = 0,59036 + j1,176905 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |Z_t| &= |(R_1 + R_r) + j(X_1 + X_r)| \\ &= |(0,5975 + 0,59036) + j(0,50733 + 1,76905)| \\ &= |1,18786 + j2,27638| = 2,061 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_1}{|Z_t|} \\ &= \frac{230,9401077}{|2,061|} = 112,0508 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= 9,55 \frac{I_1^2 R_r}{n_s} \\ &= 9,55 \frac{112,0506^2 \cdot 0,59036}{1000} = 70,78708 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Lakukan hal yang sama untuk slip 0,99 hingga 0 dengan interval 0,01 menggunakan bantuan Ms. Excel atau program sejenis. Torsi mekanik pada slip sama dengan satu adalah torsi mekanik awal, torsi pada slip 0,035 adalah torsi mekanik nominal, sedangkan torsi dengan nilai paling tinggi adalah torsi mekanik maksimum.

Masukkan parameter R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s yang telah dihitung pada langkah ke-8 dan 9 dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter Hasil Perhitungan

Parameter	Nilai Perhitungan
R_{rs}	0,59036 Ω
X_{rs}	1,76905 Ω
$ Z_{rs} $	1,31667 Ω
R_{rn}	8,16054 Ω
X_{rn}	4,75442 Ω
$ Z_{rn} $	9,44497 Ω
T_s	70,78708 Nm
T_{mek}	38,8162 Nm
T_{max}	89,9528 Nm

Tabel 4.2 di atas menunjukkan hasil perhitungan parameter-parameter motor induksi 3 fasa menggunakan nilai awal R_2' , R_2'' , X_m , X_2' , dan X_2'' .

9. Mencari selisih.

Mencari selisih antara R_{rs} , X_{rs} , Z_{rs} , R_{rn} , X_{rn} , dan Z_{rn} pada langkah no.7 dengan R_{rs} , X_{rs} , Z_{rs} , R_{rn} , X_{rn} , dan Z_{rn} pada langkah ke-8 dan mencari selisih antara T_{mek} , T_{max} , dan T_{start} pada langkah no.7 dengan T_{mek} , T_{max} , dan T_{start} pada langkah ke-9.

Tabel 4.3 Selisih Antara Parameter Referensi dan Perhitungan

Parameter	Nilai Referensi	Nilai Perhitungan	Selisih	Selisih (%)
R_{rs}	0,64655 Ω	0,59036 Ω	-0,0561 Ω	8,69
X_{rs}	1,83785 Ω	1,76905 Ω	-0,0068 Ω	0,58
$ Z_{rs} $	1,34884 Ω	1,31667 Ω	-0,0321 Ω	2,38
R_{rn}	8,31509 Ω	8,16054 Ω	-0,1545 Ω	1,85
X_{rn}	5,03859 Ω	4,75442 Ω	-0,2841 Ω	5,63
$ Z_{rn} $	9,72256 Ω	9,44497 Ω	-0,2780 Ω	2,86
T_s	74,72072 Nm	70,78708 Nm	-3,9336 Nm	5,26
T_{mek}	38,43402 Nm	38,8162 Nm	1,3821 Nm	3,59
T_{max}	85,60673 Nm	89,9528 Nm	4,3461 Nm	5,07

Tabel 4.3 di atas menunjukkan bahwa selisih antara parameter perhitungan dan parameter referensi masih di atas toleransi yang diijinkan. Toleransi yang diijinkan untuk selisih sebesar 0,5%. Oleh karena itu, mengubah nilai parameter

harus memperhatikan dampaknya terhadap T_{mek} , T_{max} dan T_s yang telah ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Setiap mengubah 1 parameter, lakukan koreksi nilai X_m seperti yang ditunjukkan pada langkah ke-6 dan lakukan langkah ke-8 hingga ke-12. Jika selisih masih di atas toleransi yang telah ditetapkan, ubah parameter selanjutnya pada Tabel 2.1. Apabila parameter terakhir telah diubah dan selisih masih di atas toleransi yang telah ditetapkan, maka ubah lagi parameter mulai dari parameter pertama.

Jika selisih antara R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s pada langkah no.7 dengan R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s yang didapatkan dari perhitungan(langkah ke-8 hingga ke-12) dalam batas toleransi, maka simpan nilai parameter R_1 , R_2' , R_2'' , X_1 , X_m , X_2' dan X_2'' .

Setelah beberapa kali perulangan, didapatkan nilai R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s seperti Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Parameter R_{rs} , X_{rx} , $|Z_{rs}|$, R_{rn} , X_{rn} , $|Z_{rn}|$, T_{mek} , T_{max} , dan T_s

Parameter	Nilai Referensi	Nilai Perhitungan	Selisih	Selisih (%)
R_{rs}	0,64655 Ω	0,6466 Ω	$5,6 \cdot 10^{-5}$ Ω	0,008
X_{rs}	1,83785 Ω	1,8351 Ω	-0,00027 Ω	0,022
$ Z_{rs} $	1,34884 Ω	1,3486 Ω	-0,00021 Ω	0,015
R_{rn}	8,31509 Ω	8,30434 Ω	-0,01074 Ω	0,129
X_{rn}	5,03859 Ω	5,01775 Ω	-0,02083 Ω	0,413
$ Z_{rn} $	9,72256 Ω	9,70257 Ω	-0,20554 Ω	0,205
T_s	74,72072 Nm	74,7317 Nm	-0,01469 Nm	0,014
T_{mek}	38,43402 Nm	38,2548 Nm	0,2548 Nm	0,254
T_{max}	85,60673 Nm	86,0156 Nm	0,4083 Nm	0,476

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa semua selisih parameter telah di bawah nilai toleransi. Selisih tertinggi pada nilai parameter T_{max} yaitu sebesar 0,476% sedangkan selisih terendah pada nilai parameter R_{rs} yakni sebesar 0,008%. Penentuan nilai toleransi yang lebih kecil akan meningkatkan akurasi estimasi parameter motor. Akan tetapi penentuan akurasi yang terlalu rendah akan membuat proses estimasi menjadi lebih lama.

Karena semua nilai selisih telah berada dibawah toleransi yang diijinkan, maka nilai estimasi parameter R_1 , R_2' , R_2'' , X_1 , X_m , X_2' dan X_2'' dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$R_1 = 0,5975 \text{ ohm}$$

$$R_2' = 0,833 \text{ ohm}$$

$$R_2'' = 0,718 \text{ ohm}$$

$$X_m = 25,42 \text{ ohm}$$

$$X_1 = 0,5073 \text{ ohm}$$

$$X_2' = 1,023 \text{ ohm}$$

$$X_2'' = 2,53 \text{ ohm}$$

Parameter-parameter di atas akan digunakan lebih lanjut dalam proses analisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda pada sub bab berikutnya.

4.2 Analisis Torsi Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6

Hasil pengukuran kecepatan rotor dan arus harmonisa waktu pada terminal motor VEM K11R 160 L6, ditunjukkan pada Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Arus Harmonisa dan Kecepatan Rotor Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

Harmonisa ke-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{1h}(A)$	4,945	1,692	1,472	0,641	0,967	0,662	0,91	0,451	0,662
$n_{rh}(rpm)$	487,5								

Karena pada penelitian ini arus pada tiap fasa dianggap seimbang, maka data yang ditampilkan pada Tabel 4.5 telah mewakili 2 fasa yang lainnya. Arus fundamental pada harmonisa ke-1 mengalir pada frekuensi 25 Hz, harmonisa ke-2 pada frekuensi 50 Hz, dan seterusnya.

4.2.1 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi Mekanik

Arus harmonisa waktu yang mengalir pada terminal motor mengakibatkan reaktansi-reaktansi motor induksi 3 fasa mengalami perubahan. Perubahan nilai reaktansi akan mengubah nilai impedansi dan torsi mekanik motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

Untuk Mengetahui Pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi mekanik, analisis harus dilakukan pada setiap orde harmonisa.

Arus harmonisa waktu(AHW) orde ke-1 termasuk harmonisa urutan positif yang menghasilkan torsi mekanik positif. Analisis perubahan nilai parameter pada rangkaian pengganti 1 fasa untuk motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda pada Gambar 2.4 untuk arus harmonisa waktu orde ke-1 dapat dianalisis menggunakan persamaan 2.53 hingga 2.62.

$$h = 1$$

$$f_1 = 25 \text{ Hz}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$X_{11} = \frac{f_1}{f} \times 0,5073 = 0,25365 \text{ ohm}$$

$$X'_{21} = \frac{f_1}{f} \times 1,023 = 0,5115 \text{ ohm}$$

$$X''_{21} = \frac{f_1}{f} \times 2,53 = 1,265 \text{ ohm}$$

$$X_{m1} = \frac{f_1}{f} \times 25,42 = 12,71 \text{ ohm}$$

$$n_{s1} = \frac{120 \cdot f_1}{p} = \frac{120 \times 25}{6} = 500 \text{ rpm}$$

$$s1 = \frac{n_{s1} - n_{rh}}{n_{s1}} = \frac{500 - 487,5}{500} = 0,025$$

$$Z_{s11} = \frac{R_2}{s1} + jX'_{21} = 28,72 + j1,265 \text{ ohm}$$

$$Z_{p1} = \frac{\frac{R_2'}{s1} \times Z_{s11}}{\frac{R_2'}{s1} + Z_{s11}} = 15,4322 + j0,3647 \text{ ohm}$$

$$Z_{s21} = Z_{p1} + jX'_{21} = 15,4322 + j0,8762 \text{ ohm}$$

$$Z_{r1} = \frac{jX_{m1} \times Z_{s21}}{Z_{s21} + jX_{m1}} = 5,6196 + j7,4446 \text{ ohm}$$

Setelah perubahan parameter diketahui, selanjutnya mencari nilai torsi mekanik yang dihasilkan saat beroperasi dengan persamaan 2.64.

$$I_{11} = 4,945 \text{ ampere}$$

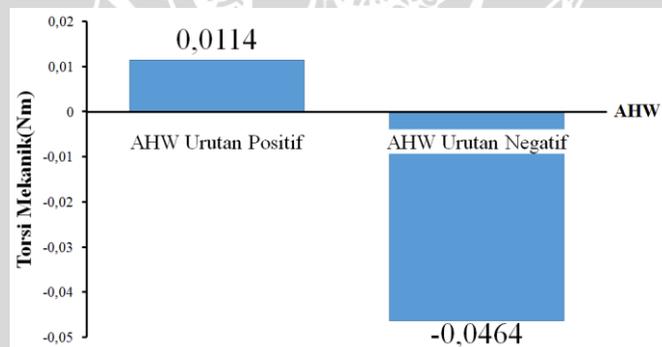
$$T_1 = 9,55 \frac{3I_{11}^2 R_{r1}}{n_{s1}} = 9,55 \frac{3 \times 4,945^2 \times 5,6196}{500} = 7,874 \text{ Nm}$$

Analisis yang sama dapat dilakukan untuk orde ke-2 dan seterusnya. Hal yang perlu diperhatikan adalah pada AHW urutan negatif (orde ke-2, 5, dan 8) slip bernilai negatif. Hal ini menyebabkan nilai torsi mekanik yang dihasilkan bernilai negatif. Sedangkan untuk AHW urutan nol, nilai slip tidak muncul karena AHW urutan nol tidak menghasilkan medan magnet putar. Nilai torsi mekanik akibat pengaruh arus harmonisa waktu dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu Terhadap Torsi Mekanik

Harmonisa ke-	Torsi Mekanik(Nm)
1	7,874
2	-0,0387
3	0
4	0,0055
5	-0,0067
6	0
7	0,0059
8	-0,001
9	0

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa AHW orde positif menghasilkan torsi mekanik positif sedangkan AHW orde negatif menghasilkan torsi mekanik negatif. Torsi mekanik negatif dan positif saling melemahkan. Sedangkan AHW urutan nol tidak menghasilkan torsi mekanik karena AHW urutan nol tidak menghasilkan medan magnet putar. Torsi yang dihasilkan arus harmonisa waktu urutan positif dan negatif ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Torsi Mekanik Yang Dihasilkan Akibat Arus Harmonisa Waktu Urutan Positif dan Negatif

Gambar 4.1 menunjukkan besar torsi yang dihasilkan oleh AHW urutan positif dan AHW urutan negatif tanpa memperhitungkan torsi yang dihasilkan oleh arus harmonisa waktu fundamental. Arus harmonisa waktu fundamental menghasilkan torsi positif sebesar 7,874 Nm. Torsi yang dihasilkan oleh AHW urutan positif dan negatif dijumlahkan secara aritmatika untuk mendapatkan total torsi mekanik.

Total Torsi mekanik akibat arus harmonisa waktu, dapat dianalisis menggunakan persamaan 2.65 berikut ini.

$$\begin{aligned}
 T_{th} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 \\
 &= 7,874 - 0,0387 + 0 + 0,0055 - 0,0067 + 0 + 0,0059 - 0,001 + 0 \\
 &= 7,839 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Total torsi mekanik motor akibat adanya arus harmonisa waktu sebesar 7,839Nm.

4.2.2 Torsi Mekanik Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)

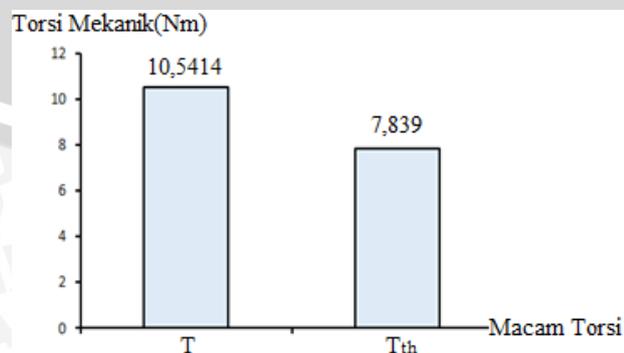
Untuk mengetahui pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi mekanik, maka diperlukan perbandingan antara torsi yang dihasilkan akibat arus harmonisa waktu dengan torsi yang dihasilkan arus sinusoida murni. Menggunakan persamaan 2.52, nilai efektif dari arus harmonisa pada Tabel 4.5 dapat dicari nilainya sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 I_{rms} &= \sqrt{\sum_{n=1}^{n=9} I_n^2} \\
 &= \sqrt{4,945^2 + 1,692^2 + 1,472^2 + 0,641^2 + 0,967^2 + 0,662^2 + 0,91^2 + 0,451^2 + 0,662^2} \\
 &= 5,7216 \text{ ampere}
 \end{aligned}$$

Besar arus efektif dari persamaan di atas diasumsikan berbentuk sinusoida murni dengan frekuensi 25 Hz. Karena bekerja pada frekuensi yang sama dengan harmonisa ke-1, maka besar resistansi rotor motor saat dicatu dengan arus sinusoida murni sama dengan nilai resistansi rotor motor saat dicatur arus harmonisa orde ke-1. Besar torsi mekanik motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda tanpa pengaruh arus harmonisa waktu dapat dihitung dengan persamaan 2,64 di bawah ini.

$$T = 9,55 \frac{3I_{rms}^2 R_{r1}}{n_{s1}} = 9,55 \frac{3 \times 5,7216^2 \times 5,897}{500} = 10,5414 \text{ Nm}$$

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan antara torsi mekanik yang dihasilkan oleh motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dengan dan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu.



Gambar 4.2 Perbandingan Torsi Mekanik dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa arus harmonisa waktu yang terjadi pada motor VEM K11R penggerak *reclaimer travelling system*, menyebabkan penurunan torsi mekanik sebesar 2,7024 yang setara dengan 25,64% dari torsi mekanik yang dihasilkan ketika motor bekerja tanpa pengaruh arus harmonisa waktu.

4.2.3 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Torsi Beban

Torsi beban merupakan pengurangan antara torsi mekanik dan rugi-rugi yang disebabkan oleh rugi gesekan, angin, dan inti. Untuk mendapatkan nilai torsi beban ketika dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu, maka diperlukan analisis perubahan nilai rugi-rugi torsi yang diakibatkan oleh rugi gesekan, angin, dan inti besi untuk semua orde harmonisa. Beberapa parameter yang telah dihitung pada sub bab sebelumnya tidak akan dihitung ulang pada sub bab ini.

Analisis akan dimulai pada AHW orde ke-1 dengan menghitung perubahan nilai rugi gesekan, angin dan inti besi. Untuk menghitung besar rugi gesekan, angin dan inti besi maka perlu dilakukan analisis perubahan daya masukan. Daya masukan pada AHW orde ke-1 dapat dicari dengan persamaan 2.63 dan 2.70.

$$Z_{t1} = Z_{r1} + (R_1 + jX_{11}) = R_{t1} + jX_{t1} = 6,2171 + j7,6983 \text{ ohm}$$

$$P_{in1} = 3I_{11}^2 \cdot R_{t1} = 3 \times 4,945^2 \times 6,2171 = 456,0841 \text{ watt}$$

Setelah mendapatkan nilai daya masukan, maka besar rugi rugi gesekan, angin dan inti besi dapat dicari dengan persamaan 2.69 di bawah ini.

$$P_{f+w+rc1} = 3,5\%P_{in1} = 3,5\% \times 456,1159 = 15,9629 \text{ watt}$$

Setelah mengetahui besar rugi gesekan, angin, dan inti besi maka, dilakukan analisis besar rugi torsi akibat rugi-rugi ini. Dengan menggunakan persamaan 2.74 dan 2.67, besar torsi beban dan rugi torsi akibat rugi gesekan, angin, dan inti besi akibat pengaruh arus harmonisa waktu dapat dianalisis sebagai berikut.

$$T_{rot1} = 9,55 \frac{P_{f+w+rc1}}{n_{rh}} = 9,55 \frac{15,9629}{487,5} = 0,3127 \text{ Nm}$$

$$T_{nh} = T_h - T_{roth} = 7,874 - 0,4074 = 7,5613 \text{ Nm}$$

Dengan cara yang sama, lakukan langkah-langkah di atas untuk orde arus harmonisa waktu lainnya. Hasil perhitungan untuk orde arus harmonisa waktu ke-1 hingga ke-9 terlihat pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Perhitungan Torsi Beban Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu

h	P_{inh} (W)	$P_{f+w+rc h}$ (W)	T_{roth} (Nm)	T_{nh} (Nm)
1	456,0841	15,9629	0,3127	7,5613
2	9,1813	-0,3213	-0,0063	-0,0324
3	3,8840	0	0	0
4	1,8827	0,0659	0,0013	0,0042
5	3,4342	-0,1202	-0,0024	-0,0044
6	0,7856	0	0	0
7	3,6467	0,1276	0,0025	0,0034
8	0,7774	-0,0272	-0,0005	-0,0005
9	0,7856	0	0	0

Tabel 4.7 menjelaskan pengaruh arus harmonisa waktu untuk setiap orde harmonisa. Harmonisa urutan negatif menghasilkan torsi beban serta rugi gesekan, angin dan inti besi yang bernilai negatif. Hal ini karena medan magnet putar yang dihasilkan oleh harmonisa urutan negatif berlawanan dengan medan magnet putar arus fundamental. Pada harmonisa urutan nol, tidak muncul medan magnet putar, sehingga hanya muncul parameter-parameter stator. hal ini mengakibatkan tidak munculnya torsi beban dan rugi-rugi rotor saat harmonisa urutan ini mengalir.

Dengan menggunakan persamaan 2.68 besar total torsi beban dapat dihitung secara matematis sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 T_{nth} &= \sum_{h=1}^{h=\infty} T_{nh} = T_{n1} + T_{n2} + T_{n3} + T_{n4} + T_{n5} + T_{n6} + T_{n7} + T_{n8} + T_{n9} \\
 &= 7,5317 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Besar total torsi beban motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu sebesar 7,5317 Nm.

4.2.4 Torsi Beban Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)

Torsi beban tanpa pengaruh arus harmonisa waktu didapatkan dengan mengasumsikan motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dicatu dengan sumber arus berbentuk sinusoida murni dengan nilai efektif yang sama dengan nilai efektif arus-arus harmonisa waktu. Pada sub bab 4.2.2 besar nilai efektif dari arus-arus harmonisa waktu telah dianalisis dan menghasilkan nilai arus efektif sebesar 5,7216 ampere.

Analisis pertama dilakukan terhadap perubahan nilai rugi gesekan, angin dan inti besi pada AHW ke-1. Asumsi besar rugi ini sangat bergantung pada besar daya

masukannya. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis terhadap perubahan daya masukan. Daya masukan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu dapat dicari dengan persamaan 2.63 dan 2.72.

$$Z_{t1} = Z_{r1} + (R_1 + jX_{11}) = R_{t1} + jX_{t1} = 6,2171 + j7,6983 \text{ ohm}$$

$$P_{inwh} = 3I_{rms}^2 \cdot R_{t1} = 3 \times 5,7216^2 \times 6,2171 = 610,5853 \text{ watt}$$

Setelah mendapatkan nilai daya masukan, maka besar rugi rugi gesekan, angin dan inti besi dapat dicari dengan persamaan 2.73 di bawah ini.

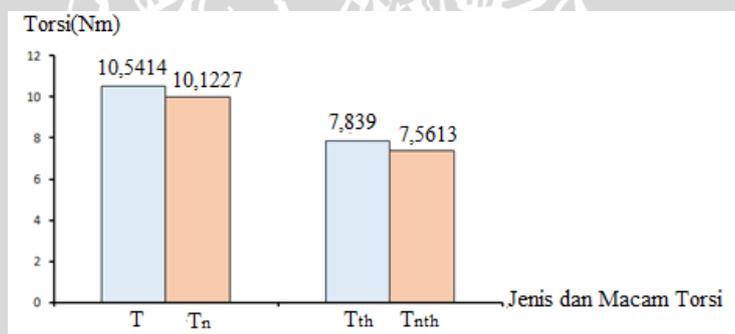
$$P_{f+w+rcwh} = 3,5\%P_{inwh} = 3,5\% \times 610,5853 = 21,3705 \text{ watt}$$

Setelah mengetahui besar rugi gesekan, angin, dan inti besi maka, dilakukan analisis besar rugi torsi akibat rugi-rugi ini. Dengan menggunakan persamaan 2.75 dan 2.76, besar torsi beban dan rugi torsi akibat rugi gesekan, angin, dan inti besi tanpa pengaruh arus harmonisa waktu dapat dianalisis sebagai berikut.

$$T_{rotwh} = 9,55 \frac{P_{f+w+rcwh}}{n_{rh}} = 9,55 \frac{21,3705}{487,5} = 0,4186 \text{ Nm}$$

$$T_n = T - T_{rotwh} = 10,5414 - 0,4186 = 10,1227 \text{ Nm}$$

Perbandingan Antara torsi beban dan torsi mekanik dengan dan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4.3 Perbandingan Torsi Beban dan Torsi Mekanik dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu

Gambar 4.3 menunjukkan besar torsi beban tanpa pengaruh harmonisa sebesar 10,1227 Nm. Jika dibandingkan dengan torsi beban dengan pengaruh arus harmonisa waktu yang hanya sebesar 7,5613 Nm. Torsi ini lebih besar 25,6%. Jika menganalisis rugi torsi akibat rugi-rugi gesekan, angin, dan inti besi dengan cara membandingkan torsi beban dan torsi mekanik, didapatkan bahwa rugi torsi tanpa pengaruh arus harmonisa waktu sebesar 3,97% dari torsi mekanik motor(T). Sedangkan rugi torsi saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu sebesar 3,92% dari torsi mekanik motor(T_{th}). Terjadi penurunan sebesar 0,05% terhadap rugi gesekan, angin dan inti besi. Hal ini disebabkan rugi gesekan dan angin akan semakin besar seiring

bertambahnya kecepatan. Ketika torsi meningkat dengan beban yang sama, maka akan terjadi percepatan dan mengakibatkan perubahan kecepatan. Kenaikan kecepatan ini yang akan memicu kenaikan rugi gesekan dan angin.

4.3 Analisis Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6

Untuk mengetahui dampak arus harmonisa waktu terhadap efisiensi motor induksi 3 fasa, maka perlu dilakukan perbandingan besar efisiensi ketika motor yang induksi 3 fasa yang dicatu dengan arus harmonisa waktu dan arus sinusoida murni dengan nilai efektif yang sama.

4.3.1 Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW) Terhadap Efisiensi

Nilai efisiensi menggambarkan seberapa baik suatu motor mengubah daya masukan menjadi daya keluaran. Oleh karena itu efisiensi erat kaitannya dengan daya masukan dan daya keluaran. Perubahan nilai daya masukan akibat arus harmonisa waktu telah dianalisis pada sub bab sebelumnya dan totalnya dapat dihitung dengan persamaan 2.75 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{inth} &= \sum_{h=1}^{\infty} P_{inh} \\ &= 456,0841 + 9,1813 + 3,8840 + 1,8827 + 3,4342 + 0,7856 + 3,6467 + \\ &0,7774 + 0,7856 = 480,4616 \text{ watt} \end{aligned}$$

Sedangkan besar daya keluaran saat dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu dapat dihitung dengan persamaan 2.82 sebagai berikut.

$$P_{outth} = \frac{T_{nth} \cdot n_{rh}}{9,55} = \frac{7,5613 \times 487,5}{9,55} = 384,4713 \text{ watt}$$

Dari data di atas, maka besar efisiensi ketika motor induksi 3 fasa dipengaruhi oleh arus harmonisa waktu dapat dianalisis menggunakan persamaan 2.81 berikut ini.

$$\eta_h = \frac{P_{outth}}{P_{inth}} \times 100\% = \frac{384,4713}{480,4616} \times 100\% = 80,0212\%$$

4.3.2 Efisiensi Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu(AHW)

Untuk mengetahui besar efisiensi motor induksi 3 fasa tanpa pengaruh dari arus harmonisa waktu, maka diasumsikan arus yang mencatu motor memiliki bentuk sinusoida murni dengan nilai efektif yang sama dengan nilai efektif arus-arus harmonisa serta kecepatan rotor diasumsikan sama. Nilai efisiensi motor induksi 3 fasa didapatkan dengan membandingkan besar daya keluaran dan daya masukan motor. Daya keluaran motor dapat dianalisis menggunakan nilai torsi yang telah dianalisis pada sub bab 4.2.4, karena bentuk dan besar arus yang digunakan untuk menganalisis efisiensi sama dengan bentuk dan besar arus saat menganalisis torsi. Begitu juga besar daya masukan juga sama dengan besar daya masukan dari analisis daya masukan pada

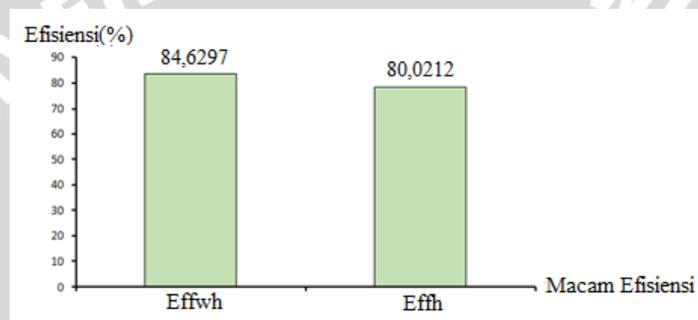
sub bab 4.2.4 yang menghasilkan nilai daya masukan sebesar 610,5853 watt . Besar daya keluaran motor dapat dihitung menggunakan persamaan 2.84 berikut ini.

$$P_{outwh} = \frac{T_n \cdot n_{rh}}{9,55} = \frac{9,996 \times 487,5}{9,55} = 516,7368 \text{ watt}$$

Karena besar daya masukan dan besar daya keluaran motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda tanpa pengaruh arus harmonisa waktu telah diketahui, maka besar efisiensi motor tanpa pengaruh arus harmonisa waktu dapat dihitung menggunakan persamaan 2.83 sebagai berikut.

$$\eta_{wh} = \frac{P_{outwh}}{P_{inwh}} \times 100\% = \frac{516,7368}{610,5853} \times 100\% = 84,6297\%$$

perbandingan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda dengan dan tanpa pengaruh arus harmonisa waktu ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Perbandingan Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda dengan dan Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu

Gambar 4.4 menunjukkan adanya penurunan harmonisa akibat pengaruh arus harmonisa waktu. Artinya terjadi kenaikan rugi-rugi ketika motor dicatu dengan sumber yang mengandung arus harmonisa waktu sehingga menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 4,6085%. Kenaikan rugi-rugi ini disebabkan oleh kehadiran arus harmonisa waktu ke-2 dan seterusnya yang mengalir pada stator dan rotor motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

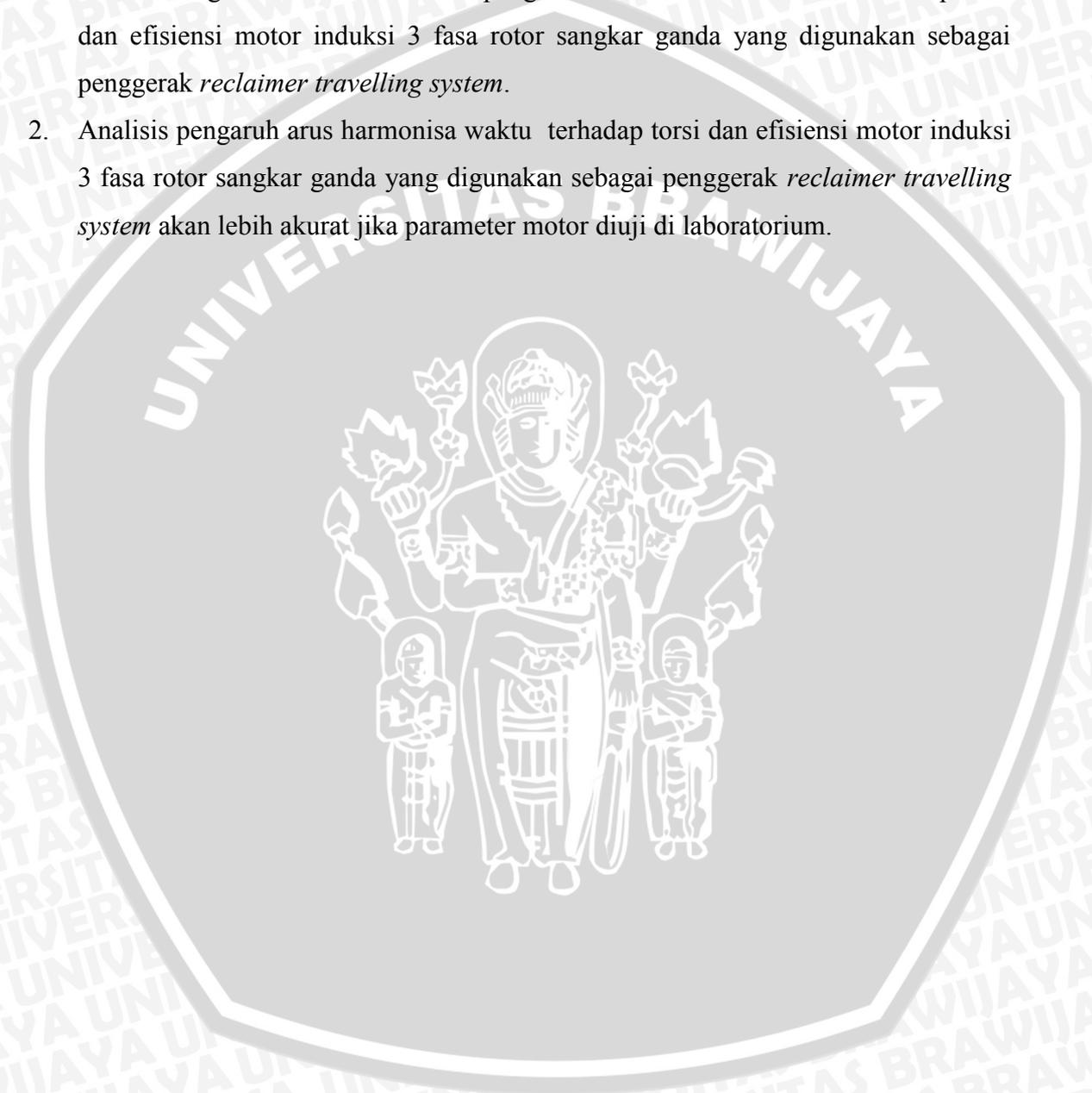
Dari penelitian tentang pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang digunakan untuk menggerakkan *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit.5 milik PT. YTL Jawa Timur, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk mendapatkan parameter-parameter motor induksi 3 fasa yang digunakan sebagai penggerak *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL tanpa harus melepas motor dari catu daya adalah melakukan estimasi menggunakan *datasheet*. Dengan menggunakan standar *IEEE 112* dan standar perancangan motor induksi 3 fasa milik *NEMA* besar rugi *stray*, rugi rotasional, dan tipe perancangan motor induksi 3 fasa dapat diketahui. Kemudian menentukan nilai toleransi yang kecil (misalnya 0,5%) untuk hasil estimasi yang lebih akurat.
2. Arus harmonisa waktu yang dihasilkan oleh *VSD (Variable Speed Drive)* yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda penggerak *reclaimer travelling system* memiliki nilai efektif sebesar 5,7216 ampere dan besar *THD (Total Harmonic Distortion)* yang terukur pada *power quality analyser 434/435* sebesar 75%.
3. Arus harmonisa waktu yang muncul pada catu daya motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda penggerak *reclaimer travelling system* mengakibatkan penurunan torsi mekanik, torsi beban, dan efisiensi pada motor tersebut. Torsi mekanik yang awalnya sebesar 10,5414 Nm turun sebesar 25,64% menjadi 7,839 Nm. Sedangkan torsi beban yang awalnya 10,1227 Nm turun sebesar 25,6% menjadi 7,5613 Nm. Efisiensi motor yang awalnya 84,6297% turun menjadi 80,0212%. Hal ini membuktikan bahwa arus harmonisa waktu mengakibatkan penurunan torsi dan efisiensi pada motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda penggerak *reclaimer travelling system*.

5.2 Saran

Ada beberapa saran yang akan berguna untuk para pembaca ketika ingin mengimplementasikan hasil penelitian ini di lapangan maupun untuk penelitian lebih lanjut diantaranya:

1. Menetapkan nilai toleransi yang lebih kecil ketika menentukan parameter motor akan meningkatkan akurasi analisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang digunakan sebagai penggerak *reclaimer travelling system*.
2. Analisis pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda yang digunakan sebagai penggerak *reclaimer travelling system* akan lebih akurat jika parameter motor diuji di laboratorium.



DAFTAR PUSTAKA

- Sen, P.C. 1997. *Principles of Electrical Machines and Power Electronics Second Edition*. Canada: John Wiley & Sons.
- IEEE-SA. 2004. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Haq, M.H. 2008. *Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters From Manufacturer Data*. Jurnal *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 23, No. 4 dipublikasikan oleh IEEE, (online: www.ieeexplore.ieee.org) diakses tanggal 23 Februari 2015.
- C. Sankaran. 2002. *Power Quality*. USA: CRC Press LLC.
- Lee, K., Frank, S., dkk. 2012. *Estimation of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters from Nameplate Data*. Jurnal dipublikasikan di Colorado: *Division of Engineering Colorado School of Mines Golden*.
- Daut, I., Anayet, K., dkk. 2009. *Parameters Calculation of 5 HP AC Induction Motor*. Jurnal dipublikasikan di Penang: *ICADME*.
- Grady, M. 2012. *Understanding Power Harmonic*. Buku elektronik diterbitkan oleh Dept. Of Electrical & Computer Engineering University of Texas, (online: www.ece.utexas.edu) diakses tanggal 2 Januari 2015.
- Mirzaamani, H.O. & Choobari, A.L. 2005. *Study of Harmonics Effects on Performance of Induction Motors*. Jurnal dipublikasikan oleh Department of Electrical Engineering Sharif University of Technology Sharif University, Tehran, Iran.
- Storr, Wayne. 2014. *Harmonics*. Artikel online, (online: www.electronics-tutorials.ws) diakses tanggal 2 Februari 2014.
- Hsu, J.S., Liou, H.P., dkk. 1991. *Losses Influenced By Third-Harmonic Flux In Induction Motors*. Jurnal *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, no. 3 dipublikasikan oleh IEEE, (online: www.utexas.edu) diakses tanggal 20 September 2014.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Datasheet Motor Induksi 3 Fasa Pabrikan VEM

Gambar di bawah ini adalah *datasheet* motor VEM yang di dapatkan dari ruangan dokumen milik PT. YTL Jawa Timur.

MOTOR SELECTION DATA											
Three phase motor with squirel cage rotor, with surface ventilation											
mode on operation S1, continuous operation, insulation class F, degree of protection IP55, design poin 400 volt, 50 Hz											
type		Pb kW	nb rpm	η b %	cos ϕ b	Ib A	Ia/Ib	Ma/Mb	Mk/Mb	J kgm ²	M kg
Synchronous speed 1000 rpm - 6 pole version											
KPER 63 K6	KPR 56 K6	0.00	898	48	0.52	0,46	2.5	2.0	2.1	0.00024	4.9
KPER 63 G6	KPR 56 G6	0.12	880	50	0.59	0,59	2.5	2.0	2.1	0.00027	5.7
K11R 132 S6	K11R 112 M6	3.0	950	78	0.76	5.35	5.3	2.2	2.7	0.01125	33.5
K11R 160 M6	K11R 132 M6	7.5	960	86	0.82	15.5	5.5	2.0	2.5	0.0530	86
K11R 160 L6	K10R 160 S6	11	965	85	0.85	22	5.0	2.0	2.3	0.11300	114
K11R 180 L6	K10R 180 L6	15	965	86	0.83	30.5	5.5	2.4	2.7	0.1450	136
K11R 200 LX6	K10R 180 S6	22	970	88.5	0.87	41	6.0	2.2	2.7	0.2680	200

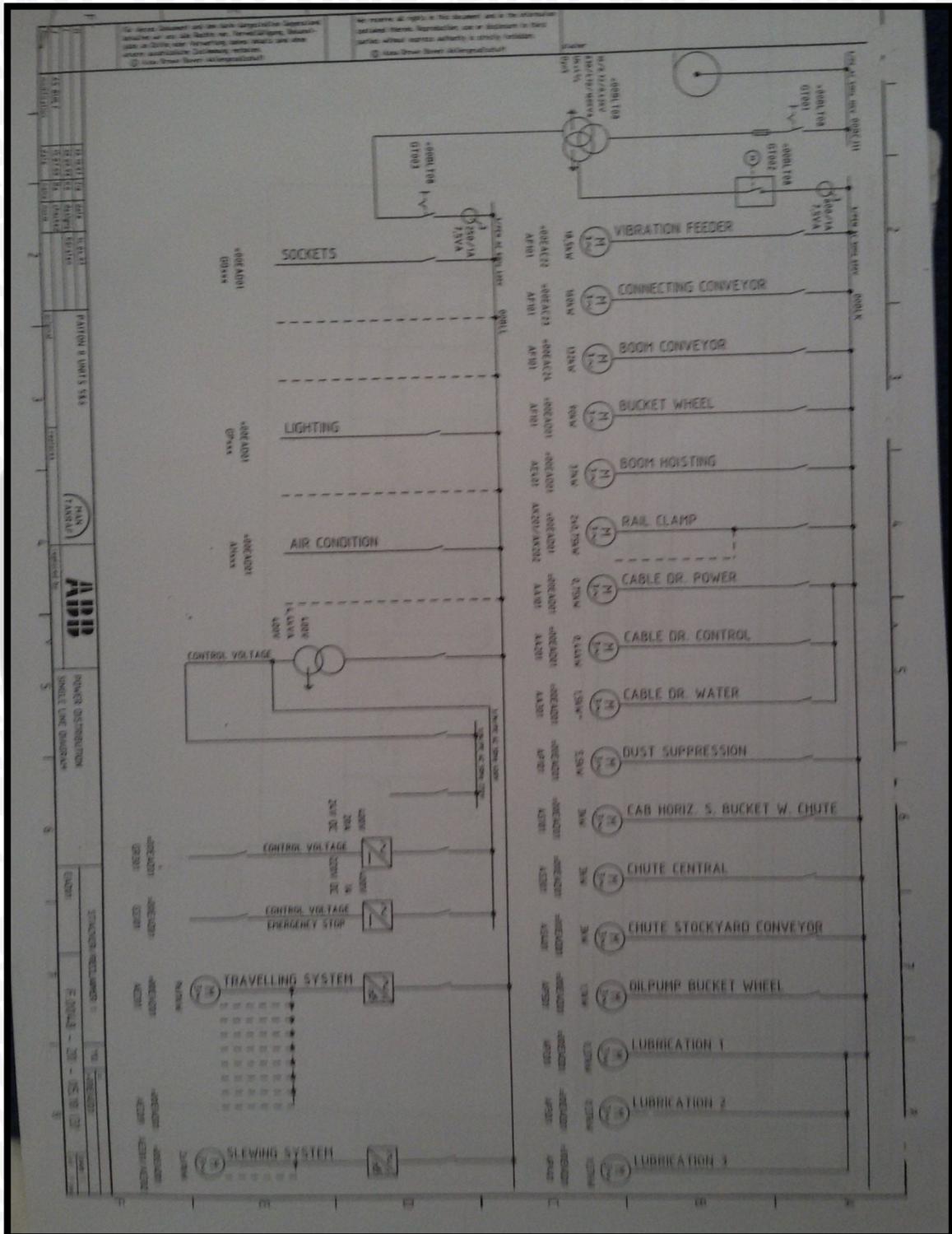
dengan:

- Pb : daya keluaran nominal(watt)
- nb : putaran nominal(rpm)
- cos ϕ b : faktor daya nominal
- Ib : arus nominal(ampere)
- Ia : arus awal(ampere)
- Ma : torsi keluaran awal(ampere)
- Mb : torsi keluaran nominal(ampere)
- Mk : torsi keluaran maksimum(ampere)
- J : inersia(kgm²)
- M : massa(kg)



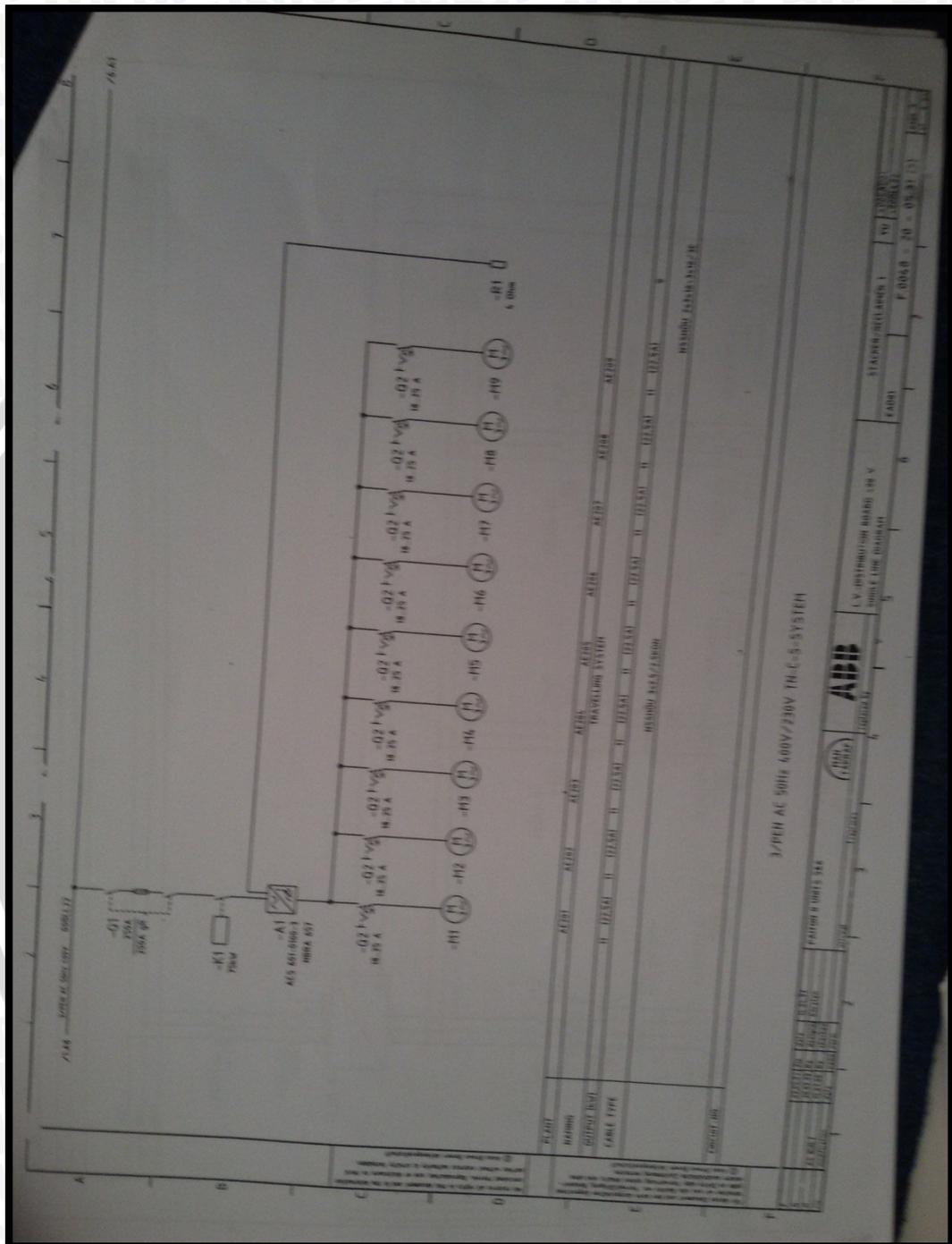
Lampiran 2a: *Single Line* dari *Reclaimer* Batu Bara

Gambar di bawah ini menunjukkan *single line* dari *reclaimer* batu bara milik PT. YTL Jawa Timur yang terdapat di unit 5 PLTU Paiton.



Lampiran 2b: *Single Line* dari *Reclaimer Travelling System*

Gambar di bawah ini menunjukkan *single line* dari *reclaimer travelling system* milik PT. YTL Jawa Timur Yang Berada di unit 5 PLTU Paiton.



Lampiran 3: Pengukuran Arus Harmonisa Waktu Pada Catu Daya Motor Induksi

3 Fasa

Pengukuran arus harmonisa waktu pada terminal motor VEM K11R penggerak *reclaimer travelling system* di PLTU Paiton unit 5 milik PT. YTL Jawa Timur menggunakan *Power Quality Analyzer* 434/435.

Title : Amps A/L1
 ID : 2
 Type : Harmonics
 Date : 07/08/2014
 Time : 9:35:58
 X Scale : 2,50E+07
 X At 0% : 0.000000E+00
 X Unit : Hz
 X Label : Frequency
 THD : 75%

Y Label	RMS(A)	Phase(Degrees)
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
2,50E+07	4,95E+06	0.000000E+00
5,00E+07	1,69E+06	-5,38E+07
7,50E+07	1,47E+06	-5,38E+07
1,00E+08	6,41E+05	2,44E+07
1,25E+08	9,67E+05	2,44E+07
1,50E+08	6,62E+05	-2,10E+08
1,75E+08	9,10E+05	-2,10E+08
2,00E+08	4,51E+05	-7,65E+07
2,25E+08	6,62E+05	-7,65E+07
2,50E+08	3,48E+05	1,78E+07
2,75E+08	7,40E+05	1,78E+07
3,00E+08	4,00E+05	-2,10E+08
3,25E+08	5,15E+05	-2,10E+08
3,50E+08	3,27E+05	-6,70E+07
3,75E+08	5,20E+05	-6,70E+07
4,00E+08	3,58E+05	-6,05E+07
4,25E+08	3,71E+05	-6,05E+07
4,50E+08	3,76E+05	-1,47E+07
4,75E+08	5,12E+05	-1,47E+07
5,00E+08	3,34E+05	-8,59E+07
5,25E+08	4,74E+05	-8,59E+07
5,50E+08	2,77E+05	-8,72E+07
5,75E+08	3,60E+05	-8,72E+07
6,00E+08	2,72E+05	-4,19E+07
6,25E+08	3,77E+05	-4,19E+07
6,50E+08	2,36E+05	-9,58E+07

6,75E+08	3,56E+05	-9,58E+07
7,00E+08	1,67E+05	-4,23E+06
7,25E+08	3,01E+05	-4,23E+06
7,50E+08	1,97E+05	-4,27E+07
7,75E+08	2,92E+05	-4,27E+07
8,00E+08	2,54E+05	-2,17E+08
8,25E+08	2,48E+05	-2,17E+08
8,50E+08	1,34E+05	9,56E+07
8,75E+08	3,48E+05	9,56E+07
9,00E+08	2,37E+05	7,41E+07
9,25E+08	3,44E+05	7,41E+07
9,50E+08	2,71E+05	1,13E+08
9,75E+08	3,75E+05	1,13E+08
1,00E+09	1,89E+05	-1,65E+08
1,03E+09	3,48E+05	-1,65E+08
1,05E+09	2,45E+05	2,61E+07
1,08E+09	3,58E+05	2,61E+07
1,10E+09	1,63E+05	4,32E+07
1,13E+09	4,47E+05	4,32E+07
1,15E+09	2,05E+05	-1,74E+08
1,18E+09	3,62E+05	-1,74E+08
1,20E+09	2,28E+05	-9,20E+06
1,23E+09	3,28E+05	-9,20E+06
1,25E+09	2,99E+05	4,86E+07
1,28E+09	3,23E+05	4,86E+07
1,30E+09	2,33E+05	3,27E+07
1,33E+09	3,43E+05	3,27E+07
1,35E+09	2,73E+05	-9,10E+07
1,38E+09	4,37E+05	-9,10E+07
1,40E+09	1,96E+05	-1,93E+08
1,43E+09	3,57E+05	-1,93E+08
1,45E+09	1,89E+05	-1,89E+08
1,48E+09	3,49E+05	-1,89E+08
1,50E+09	3,27E+05	-2,17E+08
1,53E+09	4,06E+05	-2,17E+08
1,55E+09	2,07E+05	-8,84E+07
1,58E+09	4,05E+05	-8,84E+07
1,60E+09	1,79E+05	-1,28E+08
1,63E+09	4,26E+05	-1,28E+08
1,65E+09	3,45E+05	-2,08E+08
1,68E+09	3,82E+05	-2,08E+08
1,70E+09	1,94E+05	1,91E+07
1,73E+09	3,65E+05	1,91E+07
1,75E+09	2,45E+05	1,98E+07
1,78E+09	3,50E+05	1,98E+07

1,80E+09	1,00E+05	2,03E+07
1,83E+09	2,96E+05	2,03E+07
1,85E+09	1,02E+05	1,19E+08
1,88E+09	2,24E+05	1,19E+08
1,90E+09	1,61E+05	5,02E+06
1,93E+09	2,51E+05	5,02E+06
1,95E+09	1,29E+05	-1,10E+08
1,98E+09	2,82E+05	-1,10E+08
2,00E+09	1,84E+05	-2,26E+07
2,03E+09	2,23E+05	-2,26E+07
2,05E+09	1,71E+05	-4,59E+07
2,08E+09	3,05E+05	-4,59E+07
2,10E+09	1,72E+05	8,82E+07
2,13E+09	2,97E+05	8,82E+07
2,15E+09	1,30E+05	-8,18E+07
2,18E+09	2,91E+05	-8,18E+07
2,20E+09	1,14E+05	3,41E+06
2,23E+09	2,33E+05	3,41E+06
2,25E+09	1,34E+05	1,25E+08
2,28E+09	2,11E+05	1,25E+08
2,30E+09	1,49E+05	-1,03E+08
2,33E+09	2,25E+05	-1,03E+08
2,35E+09	1,30E+05	-1,93E+08
2,38E+09	2,23E+05	-1,93E+08
2,40E+09	6,56E+04	-1,08E+08
2,43E+09	1,46E+05	-1,08E+08
2,45E+09	9,76E+04	-3,34E+07
2,48E+09	1,86E+05	-3,34E+07
2,50E+09	1,01E+05	3,13E+07
2,53E+09	0.000000E+00	3,13E+07

Lampiran 4: Perhitungan Parameter Motor Induksi 3 Fasa VEM K11R 160 L6

Hasil perhitungan parameter menggunakan bantuan MS. EXCEL ditampilkan pada Tabel di bawah ini.

Tabel Perhitungan Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda

terasi Ke	Parameter					Selisih Terhadap Nilai Referensi(%)								
	R2'	R2''	X2'	X2''	Xm	Zrn	Rrn	Xrn	Zrs	Rrs	Xrs	Ts	Tmax	Tmek
1	0,8	0,7	1,014	2,028	25,1993	2,85	1,85	5,65	2,42	8,7	0,63	5,23	5,11	3,6
2	0,81	0,7	1,014	2,028	25,13	2,44	1,87	4,84	1,99	7,92	0,29	4,98	4,86	3,07
3	0,81	0,718	1,014	2,028	24,837	1,54	0,99	3,05	2,17	8,08	2,47	4,93	5,32	1,91
4	0,81	0,718	1,02	2,028	24,87	1,52	0,97	3,03	1,81	8,11	0,01	5,37	5,09	1,9
5	0,81	0,718	1,02	2,53	25,55	1,15	0,72	2,31	1,24	2,04	1,01	0,29	1,22	1,43
6	0,83	0,718	1,02	2,53	25,43	0,32	0,19	0,67	0,32	0,23	0,35	0,15	0,66	0,41
7	0,83	0,718	1,023	2,53	25,44	0,32	0,2	0,65	0,15	0,25	0,12	0,06	0,55	0,4
8	0,833	0,718	1,023	2,53	25,42	0,2	0,12	0,41	0,015	0,008	0,022	0,01	0,47	0,25

Lampiran 5: Kode Program MATLAB 2010 Untuk Analisis Torsi dan Efisiensi

Berikut ini adalah program yang digunakan untuk menghitung pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi dan efisiensi motor induksi 3 fasa rotor sangkar ganda.

```
%Parameter Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda
kutub=6;%jumlah kutub motor
f=50;%frekuensi(Hz)

%Parameter Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk
%Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda
R1=0.5975;%resistansi stator(ohm)
R2a=0.833;%resistansi rotor lapisan luar(ohm)
R2da=0.718;%resistansi rotor lapisan dalam(ohm)
Xm=24.42;%reaktansi magnetik(ohm)
X1=0.5073;%reaktansi stator(ohm)
X2a=1.023;%reaktansi rotor lapisan dalam(ohm)
X2da=2.53;%reaktansi rotor lapisan luar(ohm)

%Motor Beroperasi Pada frekuensi fundamental 25Hz
I1h=[4.945,1.692,1.472,0.641,0.967,0.662,0.91,0.451,0.662];
nrh=487.5;
fh=25:25:225;
nsh=(120.*fh)./kutub;
nsh(2)=-nsh(2);
nsh(5)=-nsh(5);
nsh(8)=-nsh(8);
sh=(nsh-nrh)./nsh;
sh(3)=0;
sh(6)=0;
sh(9)=0;

%Perubahan Parameter Rangkaian Pengganti 1 Fasa Untuk
%Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Ganda akibat harmonisa waktu
kh=fh./f;
Xmh=kh.*Xm;
```

```

X1h=kh.*X1;
X2ah=kh.*X2a;
X2dah=kh.*X2da;
Zs1h=complex(R2da./sh,X2dah);
Zph=((R2a./sh).*Zs1h)/((R2a./sh)+Zs1h);
Zs2h=Zph+(X2ah.*1i);
Zrh=(Zs2h.*(Xmh*1i))/(Zs2h+(Xmh*1i));
Zth=Zrh+complex(R1,X1h);
Rrh=real(Zrh);
Rth=real(Zth);
%pengaruh arus harmonisa waktu terhadap torsi
Th=(9.55*3).*(I1h.^2).*Rrh./nsh;
Pinh=3.*(I1h.^2).*Rth;
Pinh(3)=3*I1h(3)^2*R1;Pinh(6)=3*I1h(6)^2*R1;Pinh(9)=3*I1h(9)^2*R1;
Pfwrch=0.035.*Pinh;
Pfwrch(3)=0;Pfwrch(6)=0;Pfwrch(9)=0;
Pfwrch(2)=-Pfwrch(2);Pfwrch(5)=-Pfwrch(5);Pfwrch(8)=-Pfwrch(8);
Troth=9.55.*Pfwrch./nrh;
Tth=Th(1)+Th(4)+Th(7)+Th(2)+Th(5)+Th(8);
Tnh=Th-Troth;
Tnh(3)=0;Tnh(6)=0;Tnh(9)=0;
Tnth=Tnh(1)+Tnh(4)+Tnh(7)+Tnh(2)+Tnh(5)+Tnh(8);
%torsi tanpa pengaruh harmonisa waktu
I1rms=sqrt(sum(I1h.^2));
T=9.55*3*(I1rms.^2)*Rrh(1)/nsh(1);
Pinwh=3*(I1rms^2)*Rth(1);
Pfwrcwh=0.035.*Pinwh;
Trotwh=9.55*Pfwrcwh./nrh;
Tn=T-Trotwh;
%pengaruh arus harmonisa waktu terhadap efisiensi
Pinth=sum(Pinh);
Poutth=(1/9.55)*Tnth*nrh;
effh=(Poutth/Pinth)*100;

```

%efisiensi tanpa pengaruh arus harmonisa waktu

%dengan Irms yang sama

$P_{outwh}=(1/9.55)*T_n*nrh;$

$effwh=(P_{outwh}/P_{inwh})*100;$

`disp(' T Tth effh effwh Tn Tnth')`

`A=[T,Tth,effh,effwh,Tn,Tnth];`

`disp(A)`

`disp('T : Torsi Mekanik Motor Induksi 3 Fasa Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

`disp('Tth : Torsi Mekanik Motor Induksi 3 Fasa Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

`disp('effh : Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

`disp('effwh : Efisiensi Motor Induksi 3 Fasa Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

`disp('Tn : Torsi Beban Motor Induksi 3 Fasa Tanpa Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

`disp('Tnth : Torsi Beban Motor Induksi 3 Fasa Akibat Pengaruh Arus Harmonisa Waktu')`

