

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. TINJAUAN PUSTAKA**

Motor Induksi adalah peralatan elektromekanik yang digunakan dalam berbagai aplikasi industri untuk mengubah tenaga listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi digunakan di berbagai bidang seperti pada pembangkit tenaga listrik, industri kertas, ladang minyak dan pabrik. Penggunaannya sebagian besar untuk penggerak pompa, *conveyor*, mesin press, elevator dan masih banyak lagi. Diantara mesin listrik yang ada, motor induksi paling banyak digunakan karena kuat, kokoh, harganya cukup murah, handal, perawatannya mudah, dan efisiensi daya cukup tinggi.

Karena proses penuaan alami dan berbagai faktor lain yang terkait dengan pola operasi motor induksi kerusakan pada motor induksi dapat terjadi. Stres elektrik dan mekanik adalah contoh dari kerusakan akibat pola operasi. Stres mekanik terjadi akibat kelebihan beban dan perubahan beban yang tiba-tiba yang dapat mengakibatkan kerusakan bearing dan patahnya rotor bar. Stress elektrik biasanya dihubungkan dengan permasalahan sumber tegangan. Sebagai contoh motor induksi yang bersumber pada AC drive memiliki kecenderungan mengalami stres elektrik akibat frekuensi tinggi dari komponen arus stator, *overvoltage* akibat panjang kabel antara motor dan AC drive akibat pantulan gelombang tegangan transien. Stres elektrik ini dapat menyebabkan hubung singkat belitan stator yang berarti kerusakan total motor induksi ,( I Gusti Putu Yudiastawan,2009)

Apabila kerusakan pada motor induksi tidak dideteksi pada tahap permulaan akan dapat mengakibatkan kerusakan yang sangat parah dengan berbagai tipe kerusakan. Kerusakan motor yang tidak terdeteksi dapat mengakibatkan *shutdown* dari proses produksi yang tentunya menyebabkan hilangnya waktu produktif akibat perbaikan mesin yang cukup lama, biaya pemeliharaan yang besar akibat banyaknya komponen yang harus diganti, dan

kerugian bahan baku produksi yang seharusnya bisa diolah namun harus terbuang karena mesin berhenti beroperasi.

## 2.2. DASAR TEORI

### 2.2.1. Kerusakan Pada Motor Induksi

Menurut survei dari *Electric Power Research Institute* (EPRI) yang mensurvei 6312 motor dan survei dari *Motor Reliability Working Group* IEEEIAS yang mensurvei 1141 motor, hasilnya seperti tabel 1.1 (I Gusti Putu Yudiastawan,2009). Kerusakan bearing berdasarkan lokasinya dapat dikategorikan sebagai kerusakan *inner-race* dan *outer-race*. Penyebab utama dari kerusakan bearing adalah tercemarnya pelumas, hilangnya minyak pelumas, beban yang berlebih dan panas yang berlebih.

Tabel 2.1 Prosentase kerusakan berdasarkan komponen motor

FAILED COMPONENT	PERCENTAGE OF FAILURES (%)	
	IEEE-IAS	EPRI
BEARINGS RELATED	44	41
WINDINGS RELATED	26	36
ROTOR RELATED	8	9
OTHERS	22	14

Kerusakan pada belitan dapat terjadi akibat panas berlebih atau voltage stress , vibrasi mekanik, abrasi atau gesekan antara stator dan rotor. Lemahnya isolasi belitan dapat menyebabkan hubung singkat antar belitan ataupun belitan dengan ground.

Ada dua tipe dari kerusakan rotor. Yang dihubungkan dengan rotor sendiri seperti retak atau patahnya rotor bar akibat panas berlebih, hot-spot atau fatigue stress saat operasi transien (start-up). Tipe kedua adalah yang berhubungan dengan *air-gap eccentricity*. *Air-gap eccentricity* adalah akibat permasalahan mekanik seperti beban tak seimbang atau *misalignment* poros. Beban tak seimbang yang berlangsung lama dapat mengakibatkan kerusakan bearing dan rumah bearing yang akan mempengaruhi simetrisnya air-gap. Shaft

misalignment berarti misalignment arah horizontal, vertikal atau radial antara poros motor dan beban yang dikopel. Karena adanya misalignment rotor akan berubah posisi dari posisi normal akibat gaya radial yang konstan (I Gusti Putu Yudiastawan,2009).

### **2.2.2.Deteksi Kerusakan Motor Induksi**

Ada beberapa metode yang sudah digunakan untuk mendeteksi dan mendiagnosa kerusakan motor induksi. Huang (2005) mengelompokkan menjadi 5 yaitu:

a) *Noise monitoring*

Spektrum sinyal akustik *noise* dari *air-gap eccentricity* digunakan untuk menganalisa kerusakan. Namun pengukuran *noise* ini secara praktek di lapangan tidak akurat karena banyaknya *noise* dari lingkungan tempat mesin berada.

b) *Torque monitoring*

Hampir semua kerusakan motor menyebabkan harmonisa dengan frekuensi tertentu dalam torsi airgap. Pada penelitian mengenai torsi airgap ini digunakan parameter tegangan terminal, data rotor, poros dan beban mekanik dari motor untuk menghitung torsi airgap. Metode ini berhasil digunakan untuk mendeteksi retak rotor bar, stator unbalance akibat kerusakan belitan. Meski demikian metode ini menjadi tidak cukup akurat ketika reaktansi magnetik bocor dan alur magnetik dari ketiga fasa menjadi tidak simetris.

c) *Flux monitoring*

Flux airgap dari motor induksi mengandung banyak harmonisa. Pengamatan terhadap flux memberikan informasi yang akurat mengenai kondisi mesin. Adanya perubahan pada airgap, belitan, tegangan dan arus tercermin dalam spektrum harmonisa. Fluks airgap diukur dengan menggunakan coil yang dipasang pada inti stator. Karena struktur tertutup dari motor induksi metode ini memerlukan pemutusan tegangan sumber untuk pemasangan sensor, sehingga sangat tidak praktis dan tidak ekonomis ketika motor sudah beroperasi terlebih dahulu. Karena airgap yang kecil pemasangan lilitan

memerlukan modifikasi desain sehingga tidak mudah untuk diimplementasikan.

d) *Vibration monitoring*

Metode ini berhasil digunakan untuk mendeteksi kerusakan mekanik, karena kerusakan mekanik menciptakan harmonisa yang unik dengan frekuensi berbeda dan level daya dalam sinyal vibrasi. Sinyal vibrasi diukur dengan menggunakan sensor vibrasi yang dipasang pada frame stator dan spektrum yang dihitung dengan Fast Fourier Transform (FFT). Harmonisa spesifik diamati untuk menentukan kerusakan apa yang terjadi. Kelemahan utama dari metode ini adalah beayanya. Sensor vibrasi khususnya accelerometer harganya mahal.

e) *Current monitoring*

Metode ini paling ekonomis dibanding metode yang lain. Pada aplikasi yang umum arus stator dari motor sudah diukur untuk proteksi mesin terhadap arus lebih, arus ke tanah yang sangat merusak. Sehingga current monitoring dilakukan tanpa perlu peralatan tambahan. Ada tiga metode yang sudah digunakan yaitu Park's vector, zero-sequence dan negative sequence dan Current Spectral Analysis. Dari ketiga metode monitoring arus Current Spectral Analysis atau sering disebut Current Signature Analysis (CSA) adalah yang paling banyak dipakai.

Fast Fourier Transform (FFT) adalah metode yang biasanya digunakan dalam aplikasi praktis untuk Current Signature Analysis (CSA). Sangat banyak penelitian dilakukan dengan metode FFT .

Menacer (2004) menggunakan current signature analysis dengan FFT untuk menganalisa kerusakan *rotor bar*. Menacer (2004) memodelkan motor induksi secara matematis dengan menghitung induktansi dari rotor dan stator yang kemudian memodelkan motor induksi dengan model Mesh. Model secara matematis tersebut disimulasikan dengan program Matlab. Metode ini mampu mengenali kerusakan rotor bar dengan baik. Simulasi untuk aplikasi di dunia industri sangat tidak cocok karena terkadang data-data motor seperti nilai resistansi, induktansi dan data material motor sulit untuk diketahui dan harus

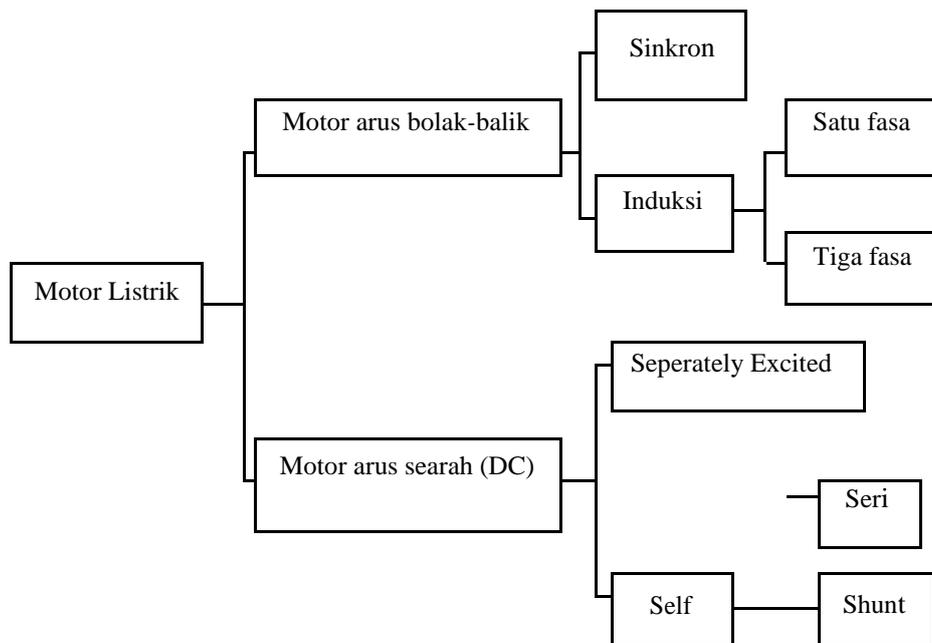
melakukan pengukuran tersendiri yang tentunya tidak praktis dari segi waktu dan biaya.

Szabò, Dobai dan Birò (2003) membuat instrumentasi maya untuk mendeteksi kerusakan rotor. Instrumentasi maya yang digunakan adalah software Labview dengan analisa sinyal arus dengan FFT. Penelitian mengenai deteksi kerusakan motor induksi dengan instrumentasi maya juga dilakukan oleh Pillay dan Xu (1996). Önel , Dalci dan Senol (2005) menggunakan CSA dengan FFT untuk mendeteksi kerusakan pada bearing motor.

Berbagai instrumen khusus untuk Current Signature Analysis sudah dikembangkan dan digunakan dalam praktek di industri. Thomson dan Fenger (2001) melakukan studi kasus terhadap berbagai motor yang digunakan dalam industri menggunakan alat ukur CSMeter yaitu instrumen khusus dari Iris Power Engineering untuk analisa arus (CSA) dengan FFT dan mampu mendeteksi kerusakan rotor bar, airgap eccentricity, pengaruh dari gearbox. Penrose (2003) juga menggunakan CSA dengan FFT untuk mendeteksi berbagai kerusakan pada motor induksi dengan alat ukur berbeda yaitu ALL-TEST PRO 2000 dan EMCAT yaitu software untuk motor manajemen. Berbagai metode analisa sinyal selain FFT juga banyak digunakan untuk current signature analysis untuk studi kasus tertentu. Ayhan (2005) mendeteksi patahnya rotor bar dengan menggunakan CSA dengan Notch filter, Discrete time fourrier transform (DTFT) dan Auto Regressive based spectrum. Supangat (2004) menggunakan CSA dengan *Continous Wavelet Transform* (CWT) untuk menganalisa arus mula dari motor induksi untuk mendeteksi kerusakan pada rotor bar. Penggunaan kecerdasan buatan sebagai sistem expert juga banyak dilakukan. Benbouzid (2005) menggunakan Fuzzy Logic untuk memonitor kondisi stator. Lehtonen dan Koivo (2006) menggunakan dynamical neural network dengan memodelkan motor induksi dengan Finite Element Method (FEM). Önel , Dalci dan Senol (2005) menggunakan Radial Basis Function Neural Network untuk mendeteksi kerusakan bearing dimana metode CSA yang dipakai adalah Park's transform. Metode kecerdasan buatan ini secara praktik di industri belum banyak dipakai karena banyaknya parameter yang dipakai dan dengan hardware yang

berkembang sekarang belum cukup cepat dan praktis ( I Gusti Putu Yudiastawan,2009)

### 2.3. Klasifikasi Motor Listrik



Gambar 2.1 Klasifikasi motor listrik

Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id/jenis-jenis-motor-listrik/>

#### 2.3.1. Motor Listrik Arus Bolak-Balik AC

Motor listrik arus bolak-balik adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik bolak balik (AC, Alternating Current). Motor listrik arus bolak-balik AC ini dapat dibedakan lagi berdasarkan sumber dayanya sebagai berikut:

1. Motor sinkron, adalah motor AC bekerja pada kecepatan tetap pada sistim frekwensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torque awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekwensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistim, sehingga sering digunakan pada sistim yang menggunakan banyak listrik.

2. Motor induksi, merupakan motor listrik AC yang bekerja berdasarkan induksi medan magnet antara rotor dan stator. Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama sebagai berikut :
  1. Motor induksi satu fase. Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti fan angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.
  2. Motor induksi tiga fase. Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fase yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, belt conveyor, jaringan listrik, dan grinder. Tersedia dalam ukuran 1/3 hingga ratusan Hp

### **2.3.2. Motor Listrik Arus Searah DC**

Motor listrik arus searah adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik searah (DC, Direct Current). Motor listrik arus searah DC ini dapat dibedakan lagi berdasarkan sumber dayanya sebagai berikut :

1. Motor DC sumber daya terpisah/ *Separately Excited*. Adalah jenis motor DC yang sumber arus medan disupply dari sumber terpisah, sehingga motor listrik DC ini disebut motor DC sumber daya terpisah (separately excited).
2. Motor DC sumber daya sendiri/ *Self Excited*. Adalah jenis motor DC yang sumber arus medan disupply dari sumber yang sama dengan kumparan motor listrik, sehingga motor listrik DC ini disebut motor DC sumber daya sendiri (self excited).

Motor DC sumber daya sendiri / *self excited* ini dibedakan lagi menjadi 3 jenis berdasarkan konfigurasi supply medan dengan kumparan motornya sebagai berikut:

1. Motor DC shunt, Pada motor DC shunt gulungan medan (medan shunt) disambungkan secara paralel dengan gulungan motor listrik. Oleh karena itu total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus dinamo.
2. Motor DC Seri, Pada motor DC seri, gulungan medan (medan shunt) dihubungkan secara seri dengan gulungan kumparan motor (A). Oleh karena itu, arus medan sama dengan arus dinamo.
3. Motor DC Kompon/Gabungan, Motor Kompon DC merupakan gabungan motor seri dan shunt. Pada motor kompon, gulungan medan (medan shunt) dihubungkan secara paralel dan seri dengan gulungan motor listrik. Sehingga, motor kompon memiliki torque penyalan awal yang bagus dan kecepatan yang stabil.

#### **2.4. Berdasarkan Macam Arus**

##### **1. Satu phasa**

Motor ini hanya memiliki satu gulungan *stator*, beroperasi dengan pasokandaya satu phasa, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.

##### **2. Tiga phasa**

Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga phasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, *belt conveyor*, jaringan listrik, dan *grinder*.

Jenis dari motor-motor listrik tersebut sangatlah banyak seperti pada

gambar diatas, namun yang akan dikaji pada laporan ini yaitu motor induksi 3 fasa karena motor ini banyak dimanfaatkan diindustri. Total motor induksi yang beroperasi di PT PJB UBJ O&M PLTU Rembang ± 250 motor. Fungsi dari motor induksi 3 fasa ini pada PLTU Rembang sebagai penggerak pompa air ketel, motor penggerak pompa air ketel, motor penggerak pompa air pendingin kondensor, motor penggerak penggiling batubara, motor penggerak kipas penghisap dan kipas penekan udara ketel, motor pemutar poros turbin, motor penggerak pompa sirkulasi minyak pelumas yang memberi pelumasan ke bantalan turbin dan bantalan generator, motor penggerak penyemprot bahan bakar ke ruang ketel.

Berikut adalah nama motor-motor yang ada di PT PJB UBJ O&M PLTU Rembang

Tabel 2.2 Motor listrik di PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG

Motor 400 Volt			
1	Booster Pump For t-BFP	12	Generator air Side DC Emergency Seal Oil Pump
2	Generator Stator Cooling Water Pump	13	Generator H2 Side Seal Oil Pump
3	Control Fluid Feed Pump	14	Circulating Water Booster Pump
4	BFP Turbine a Lube-Oil System Main Oil Pump	15	Bypass Hydraulic Pump
5	BFP Turbine a lube oil system DC emergency lube oil pump	16	Vacum Pompa
6	Turbine Jacking Oil Pump	17	Recirculating Pump
7	Generator seal Oil Vapor Exhaust Fan	18	Gland Steam Condensor Extraction Fan
8	Turbin AC Oil Pump	19	Condensate Make Up Water Pump
9	Turbine Main oil Tank Exhaust	20	Mill Lube Oil Pump

	Fant		
10	Turbine DC emergency oil pump	21	Fluidizing Blower ESP
11	Generator Air Side Seal Oil Pump	22	Primary Motor Air Heater

Tabel 2.3 Motor listrik di PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG

Motor 400 Volt			
23	Secondary Motor Air Heater	38	Raw Water Pump
24	Coal Feeder	39	Service Water Pump
25	Induced Draft Fan Cooling Fan motor	40	Demin Water Pump
26	Forced Draft Fan Hydraulic Moving Blade Pump	41	Make Up water Booster Pump
27	FlameScanner Cooling Air Fan	42	Brine Blowdown Pump
28	Sealing Air Fan	43	Distilate Pump
29	Screen Wash Pump	44	Distilate Water Injection Pump
30	Dual Flow Band Screen	45	Waste water Pump
31	Motor Circulating Water Supply pump	46	Neutralization Waste Water Pump
32	Desalination Pump	47	Clarifier Sludge Pump
33	HSD Forwarding Pump	48	Cleaning Water Pump
34	HSD unloading Pump	49	Cantilever Conveyor
35	HSD Transfer Pump	40	Lifting Motor for Hold
36	ECP Seawater Booster Pump	51	Lifting Motor for close
37	ECP dosing pump	52	Aerification Box of Fly Ash Silo Blower

Tabel 2.4 Motor listrik di PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG

Motor 6,3 kV			
1	Motor Driven Boiler Feed Water Pump	5	Forced Draft Fan
2	Closed Circulating water Pump	6	Circulating Water Pump
3	Medium Speed Mill	7	Induced Draft Fan
4	Primary Air Fan	8	Crushe

Berikut adalah contoh gambar motor-motor yang ada di PT PJB UBJ O&M PLTU Rembang :



Gambar 2.2 Mesin *Generator Stator Cooling Water Pump #20B*

Tabel 2.5. Spesifikasi Motor generator stator cooling water pump#20B

Nama Peralatan	<i>Generator Stator Cooling Water Pump #20 B</i>
Asset ID	LR20MKF10AP002
Daya	22 kW
Tegangan	400 Volt
Arus Start	40,1 Ampere
Rotasi	2940 RPM
Frekuensi	50 Hz



Gambar 2.3 Motor *Generator Stator Cooling Water Pump A*

Tabel 2.6. Spesifikasi Motor *Generator Stator Cooling Water Pump A*

Nama Peralatan	GENERATOR STATOR COOLING WATER PUMP 20 A
Daya	132 KW
Tegangan	400 Volt
Arus Normal	224 Amps
Rotasi	1485 RPM
Frekuensi	50 Hz



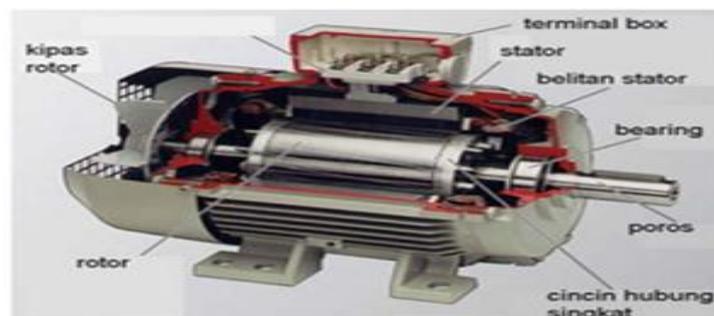
Gambar 2.4 *Motor Lube Oil Bfpt Pump*

Tabel 2.7. Spesifikasi *Motor Lube Oil Bfpt Pump*

Nama Peralatan	LUBE OIL BFPT PUMP
Daya	18.5 KW
Tegangan	400 Volt
Arus Normal	33.9 Amps
Rotasi	2930 RPM
Frekuensi	50 z

## 2.5. Konstruksi motor induksi

Pada dasarnya motor induksi terdiri dari suatu bagaian yang tidak berputar (stator) dan bagian yang bergerak memutar (rotor) seperti pada gambar 2.1. Secara ringkas stator terdiri dari blek – blek dinamo yang berisolasi pada satu sisinya dan mempunyai ketebalan 0,35 – 0,5 mm, disusun menjadi sebuah paket blek yang berbentuk gelang. Disisi dalamnya dilengkapi dengan alur – alur. Didalam alur ini terdapat perbedaan antara motor asinkron dengan lilitan sarang (rotor sarang atau rotor hubung pendek) dan gelang seret dengan lilitan tiga fasa. Atau dari sisi lainnya bahwa inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan (email) baja silikon tebalnya 0,35 - 0,5 mm, tersusun rapi, masing – masing terisolasi secara elektrik dan diikat pada ujung – ujungnya.



Gambar 2.5 Konstruksi Motor Induksi

Sumber : <http://elektro-unimal.blogspot.co.id/2013/05/konstruksi-motor-listrik-3-fasa.html?m=1>

Lamel inti besi stator dan rotor bagian motor dengan garis tengah bagian motor, dengan garis tengah bagian luar dari stator lebih dari 1 m. Bagi motor dengan garis tengah yang lebih besar, lamel inti besi merupakan busur inti segmenyang disambung – sambung menjadi satu lingkaran. Celah udara antara stator dan rotor pada motor yang kecil adalah 0,25 – 0,75 mm, pada motor yang besar sampai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan bagi kemungkinan terjadinya perenggangan pada sumbu sebagai akibat pembebanan transversal pada sumbu atau sambungannya. Tarikan pada pita (belt) atau beban yang tergantung tersebut akan menyebabkan sumbu motor melengkung.

Pada dasarnya inti besi stator dan belitan rotor motor tak serempak ini sama dengan stator dan belitan stator mesin serempak. Kesamaan ini dapat ditunjukkan bahwa pada rotor mesin tak serempak yang dipasang / sesuai dengan stator mesin tak serempak akan dapat bekerja dengan baik.

### **2.5.1 Stator (bagian motor yang diam)**

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing – masing berbeda fasa dan menerima arus dari tiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat – plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya flux magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

Konstruksi stator motor induksi sendiri terdiri atas beberapa bagian yaitu:

1. Bodi motor (gandar)
2. Inti kutub magnet dan lilitan penguat magnet
3. Slip rin

Bentuk konstruksi stator motor induksi dapat kita lihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.6 Stator

Sumber : [http://kuliahelektro.blogspot.co.id/2011/01/motor-induksi-3-fasa\\_30.html](http://kuliahelektro.blogspot.co.id/2011/01/motor-induksi-3-fasa_30.html)

1. Bodi motor (gandar)

Fungsi utama dari bodi atau gandar motor adalah sebagai bagian dari tempat mengalirnya fluks magnet yang dihasilkan kutub – kutub magnet, karena itu beban motor dibuat dari bahan ferromagnetik. Disamping itu badan motor ini berfungsi untuk meletakkan alat – alat tertentu dan melindungi bagian – bagian mesin lainnya. Biasanya pada motor terdapat papan nama atau name plate yang bertuliskan spesifikasi umum dari motor.

2 Inti Kutub Magnet dan Lilitan Penguat Magnet

Sebagaimana diketahui bahwa fluks magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub magnet buatan yang dibuat dengan prinsip elektromagnetis. Lilitan penguat magnet berfungsi untuk mengalirkan arus listrik agar terjadi proses elektromagnetis.

**2.5.2. Rotor (bagian motor yang bergerak)**

Berdasarkan hukum Faraday tentang imbas magnet, maka medan putar yang secara relatif merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar

rotor akan mengibaskan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi ggl imbas ini sama dengan frekuensi jala – jala.

Besar ggl imbas ini berbanding lurus dengan kecepatan relatif antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar – penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian melaju bagi arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum lenz.

Arahnya melawan fluksi yang mengimbas, dalam hal ini arus rotor itu ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator, untuk mengurangi beda kecepatan diatas. Jika rotor dibebani, maka putaran rotor akan turun sehingga terjadi perbedaan kecepatan putaran antara rotor dan stator, perbedaan kecepatan putaran ini disebut slip.



Gambar 2.7 Rotor

Sumber : [http://kuliahelektro.blogspot.co.id/2011/01/motor-induksi-3-fasa\\_30.html](http://kuliahelektro.blogspot.co.id/2011/01/motor-induksi-3-fasa_30.html)

## 2.6. Motor rotor sangkar

Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan

paralel, atau kira – kira paralel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubung singkatkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangka yang lebih kecil adalah coran tembaga atau almunium dalam satu lempeng pada inti rotor. Bentuk motor rotor sangkar sendiri dapat dilihat pada gambar 5.53. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan kedalam alur kemudian dilas ditempatkan paralel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.



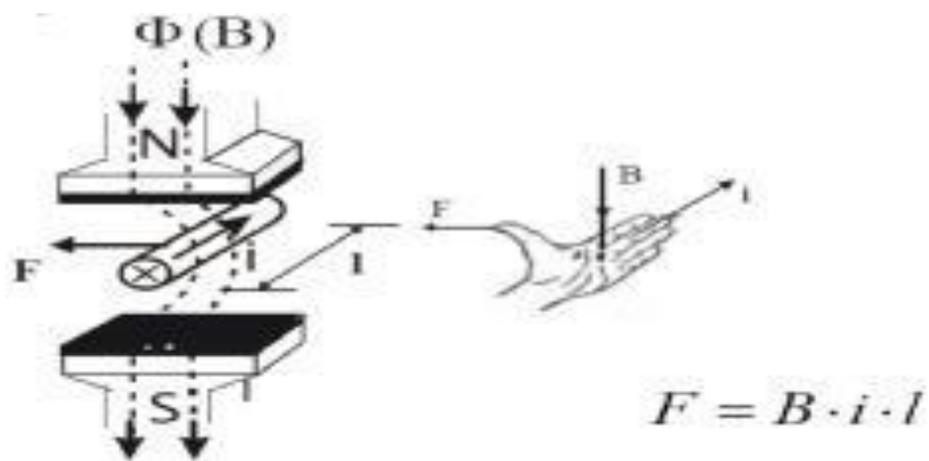
Gambar 2.8 Bentuk rotor sangkar

Sumber:<http://infokitabersama123.blogspot.co.id/2013/09/prinsip-kerja-motor-ac-satu-phaa.html>

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai yang terlihat pada gambar dibawah ini, konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor jenis mesin listrik lainnya.

Dengan demikian harganya pun murah karena konstruksinya yang demikian, padanya tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi dengan rotor belitan. Untuk membatasi arus mula yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya digunakan oto transformator atau saklar Y – D. Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula, untuk mengatasi hal ini dapat digunakan jenis rotor dengan sangkar ganda.

## 2.7. Prinsip Kerja Motor Induksi



Gambar 2.9 Prinsip Kerja Motor Induksi dengan kaedah tangan kanan

Sumber : <https://kaydier.wordpress.com/2013/05/25/motor-induksi-3-phase/>

Keterangan :

- F = Gaya
- B = Kerapatan fluks
- I = Arus
- L = Konduktor

Arus listrik ( $i$ ) yang dialirkan di dalam suatu medan magnet dengan kerapatan Fluks ( $B$ ) akan menghasilkan suatu gaya ( $F$ ).

Motor Induksi 3 Fasa bekerja seperti kita memiliki sumber AC 3 fasa yang terhubung dengan stator pada motor. Karena stator terhubung dengan sumber AC

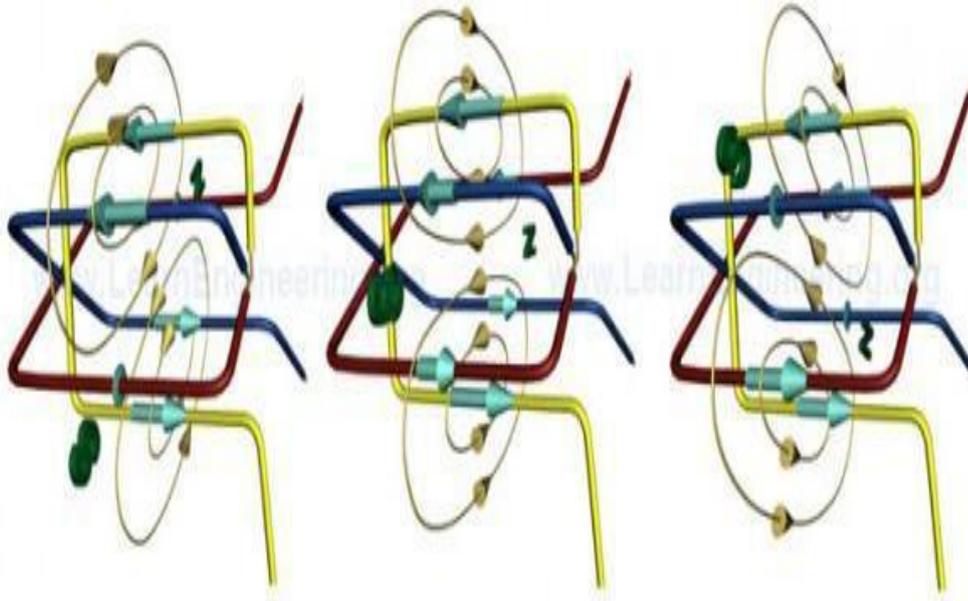
maka arus dapat masuk ke stator melalui kumparan stator. Sekarang kita hanya melihat 1 kumparan stator saja. Sesuai hukum faraday bahwa apabila terdapat arus yang mengalir pada suatu kabel maka arus itu dapat menghasilkan fluks magnet pada kabel tersebut, dimana arahnya mengikuti kaidah tangan kanan



Gambar 2.10 Arus pada kabel menghasilkan fluks

<http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-motor-induksi-3-fasa/>

Setiap fasa dalam kumparan stator akan mengalami hal yang sama karena setiap fasa dialiri arus, namun besarnya fluks yang dihasilkan tidak sama di setiap waktu. Hal ini disebabkan besarnya arus yang berbeda-beda pada tiap fasa di tiap waktunya. Misalkan fasa-fasa ini diberi nama a, b, dan c. Ada kalanya arus pada fasa a maksimum sehingga menghasilkan fluks maksimum dan arus fasa b tidak mencapai maksimum, dan ada kalanya arus pada fasa b maksimal sehingga menghasilkan fluks maksimum dan arus pada fasa a tidak mencapai maksimum. Hal ini mengakibatkan fluks yang dibangkitkan lebih cenderung pada fasa mana yang mengalami kondisi arus paling tinggi. Secara tidak langsung dapat dikatakan bahwa medan magnet yang dibangkitkan juga ikut “berputar” seiring waktu. Kecepatan putaran medan magnet ini disebut kecepatan sinkro



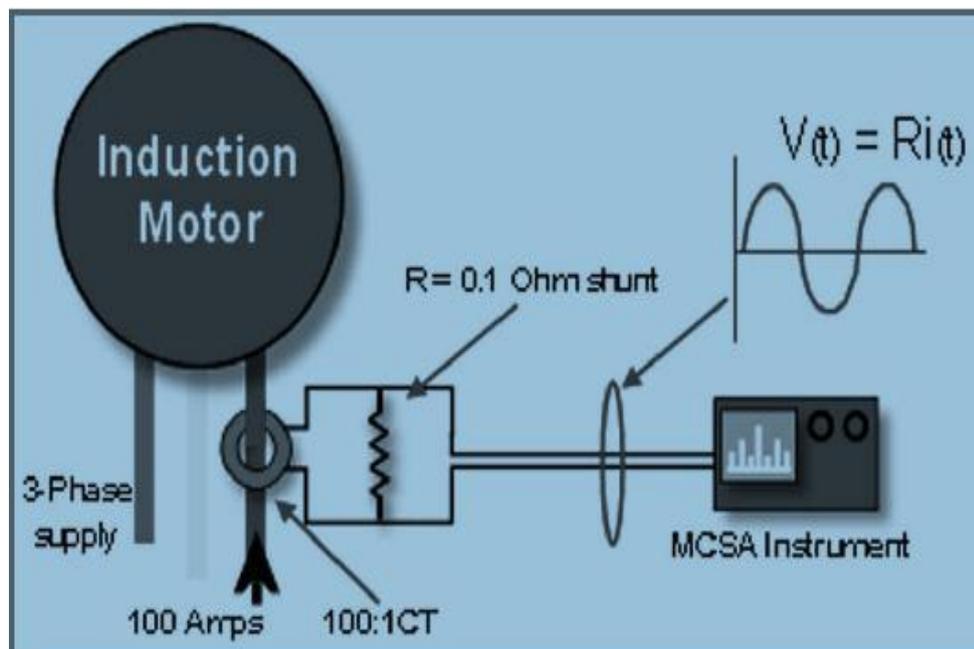
Gambar 2.11 Gambar Medan magnet berputar

Sumber : <http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-motor-induksi-3-fasa/>

Sekarang ditinjau kasus rotor sudah dipasang dan kumparan stator sudah dialiri arus. Akibat adanya fluks pada kumparan stator maka arus akan terinduksi pada rotor. Anggap rotor dibuat sedemikian sehingga arus dapat mengalir pada rotor (seperti rotor tipe squirrel cage). Akibat munculnya arus pada rotor dan adanya medan magnet pada stator maka rotor akan berputar mengikuti hukum Lorentz. Hal yang menarik disini ialah kecepatan putaran rotor tidak akan pernah mencapai kecepatan sinkron atau lebih. Hal ini disebabkan karena apabila kecepatan sinkron dan rotor sama, maka tidak ada arus yang terinduksi pada rotor sehingga tidak ada gaya yang terjadi pada rotor sesuai dengan hukum Lorentz. Akibat tidak adanya gaya pada rotor maka rotor jadi melambat akibat gaya-gaya kecil (seperti gaya gesek dengan sumbu rotor atau pengaruh udara). Namun saat rotor melambat kecepatan sinkron dan kecepatan rotor jadi berbeda. Akibatnya pada rotor akan terinduksi arus sehingga rotor mendapatkan gaya berdasarkan hukum Lorentz. Dari gaya itulah motor dapat menambah kecepatannya kembali. Fenomena perbedaan kecepatan ini dikenal sebagai slip.

## 2.8. MCSA (*Motor Current Signature Analysis*)

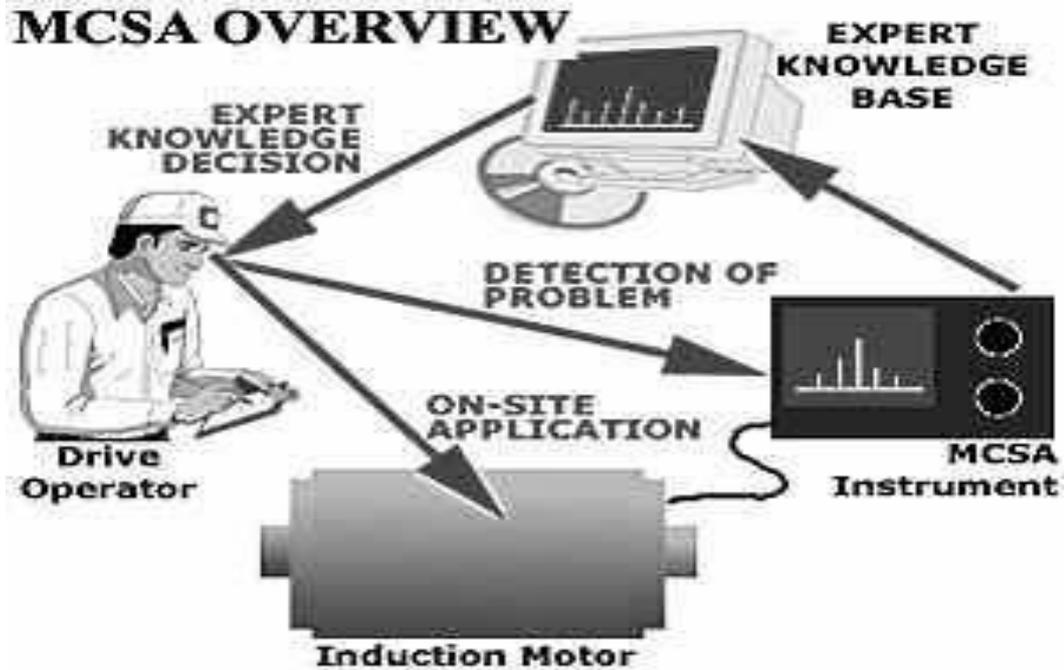
MCSA adalah suatu metode *condition monitoring* pada motor induksi tiga fasa dengan cara menganalisa arus yang melewati winding stator. Prosedur MCSA yaitu pengambilan arus dari winding stator menggunakan sensor dari *current transformer* dalam *probe* MCSA kemudian data dianalisa dan disimpan di CSi 2130 dalam bentuk sinyal, apabila terjadi gangguan maka dianalisa lagi menggunakan software *AMS Healthy Machinery*



Gambar 2.12 Dasar Sistem Instrumentasi MCSA

Sumber : [http://www.mcsamotor.com/mcsa\\_frame.asp](http://www.mcsamotor.com/mcsa_frame.asp)

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa prosedur dalam MCSA yaitu pengambilan arus dari winding stator menggunakan sensor dari *current transformer* didalam probe MCSA, kemudian data dianalisa dan disimpan sementara di CSi 2130, jika mengalami gangguan maka data tersebut akan dianalisa menggunakan software *AMS Healthy Machinery* . Berikut bagan proses pengambilan data MCSA sesuai gambar dibawah ini.



Gambar 2.13 Overall MCSA Strategy.

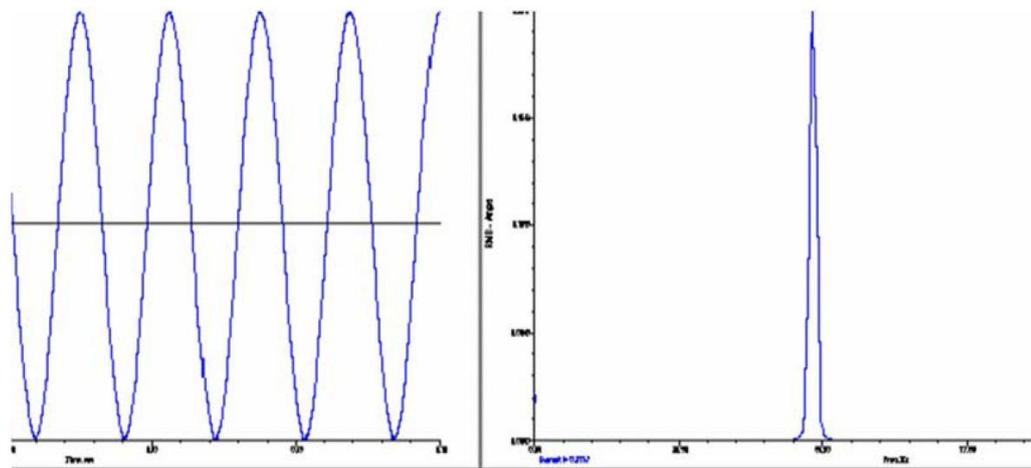
Sumber : [http://www.mcsamotor.com/mcsa\\_frame.asp](http://www.mcsamotor.com/mcsa_frame.asp)

Motor current signature analysis (MCSA) adalah suatu sistem untuk meneliti atau kecenderungan dinamis, yang diberi sistem tenaga.

Analisa sesuai hasil MCSA akan membantu teknisi dalam mengidentifikasi :

1. Kesehatan lilitan incoming
2. Kesehatan gulungan stator
3. Kesehatan rotor
4. Air gap static dan dynamic eccentricity
5. Kesehatan coupling, termasuk belt sistem dan gear sistem
6. Beban
7. Beban sistem dan efisiensi
8. Kesehatan bearing

Suatu sinyal arus motor idealnya suatu gelombang sinusoidal sempurna pada 50Hz. Dengan gambar, kita dapat menghadirkan arus dalam kaitan dengan waktu seperti halnya frekuensi. Pada gambar 2.10 menampilkan gambar yang pertama (gambar 2.10 a) yaitu hubungan arus dan waktu, sedangkan gambar kedua (gambar 2.10 b) menampilkan hubungan arus dan frekuensi. Gambar 2.10 Sinyal 50 Hz dalam domain time dan frequency



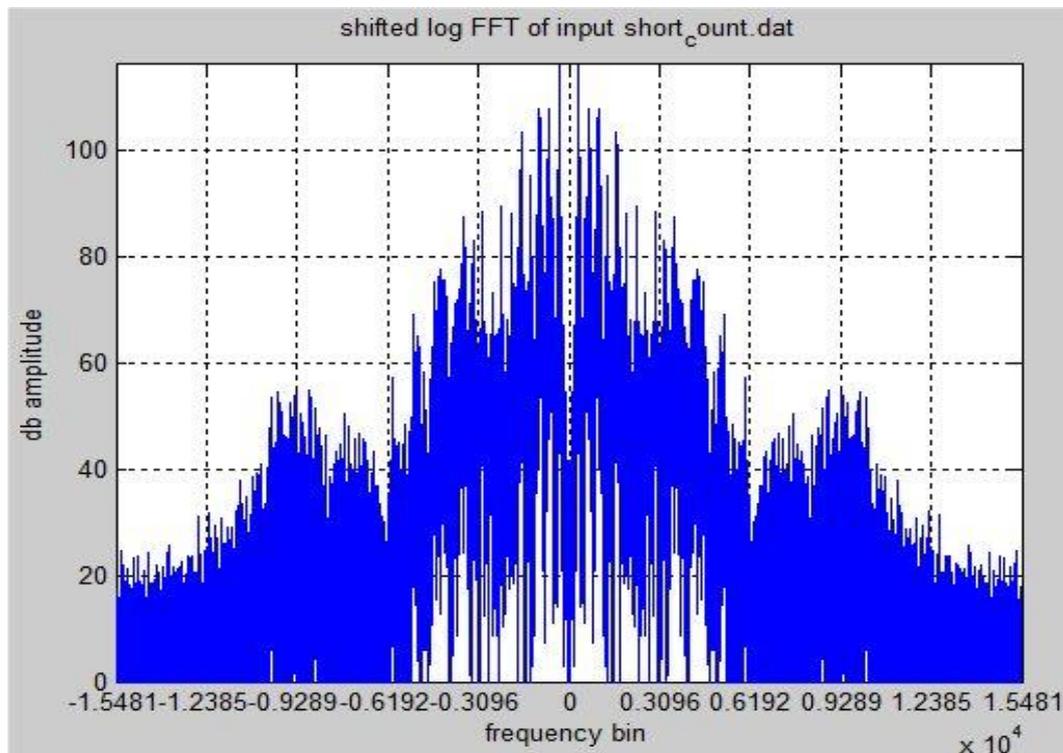
(a). Hubungan arus dan waktu

(b).Hubungan arus dan frekuensi

Gambar 2.14 Sinyal 50 Hz dalam domain time dan frequency

Amplitudo dari puncak frekuensi adalah sama dengan RMS amplitudo dari gelombang sinus. Ini adalah suatu teoritis dengan tidak adanya suatu harmonisa, kita dapat melihat hanya ada satu puncak dalam spektrum frekuensi. Konversi arus dari waktu ke daerah frekuensi dicapai dengan menggunakan algoritma Fast Fourier Transform (FFT).

Selama motor beroperasi, akan banyak sinyal harmonisa hadir di motor. Suatu sinyal akan menunjukkan banyak peak yang mencakup line frekuensi dan harmonisanya. Hal inilah yang dikenal dengan sebagai motor's current signature. Penelitian harmonisa ini setelah pengaruh amplifikasi dan kondisi sinyal akan memungkinkan identifikasi berbagai kesalahan pada motor.



Gambar 2.15 Fast Fourier Transform (FFT)

Pada tahun 1960, J. W. Cooley dan J. W. Tukey, berhasil merumuskan suatu teknik perhitungan algoritma Fourier Transform yang efisien. Teknik perhitungan algoritma ini dikenal dengan sebutan Fast Fourier Transform atau lebih populer dengan istilah FFT yang diperkenalkan oleh J.S.Bendat dan A.G.Piersol pada 1986. Fast Fourier Transform dalam bahasa Indonesia adalah Transformasi Fourier Cepat adalah sumber dari suatu algoritma untuk menghitung Discrete Fourier Transform (transformasi Fourier diskrit atau DFT) dengan cepat. Fast Fourier Transform (FFT) diterapkan dalam beragam bidang dari pengolahan sinyal digital dan memecahkan persamaan diferensial parsial menjadi algoritma-algoritma untuk pengandaan bilangan integer dalam jumlah banyak. Ada pun kelas dasar dari algoritma FFT yaitu decimation in time (DIT) dan decimation in frequency (DIF). Garis besar dari kata Fast diartikan karena formulasi FFT jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode perhitungan algoritma Fourier Transform.

Metode FFT memerlukan sekitar 10000 operasi algoritma matematika untuk data dengan 1000 observasi, 100 kali lebih cepat dibandingkan dengan metode sebelumnya. Penemuan FFT dan perkembangan personal komputer, teknik *FFT* dalam proses analisa data menjadi populer, dan merupakan salah satu metode baku dalam analisa data. Satu bentuk transformasi yang umum digunakan untuk merubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi adalah Transformasi Fourier:

Persamaan dari bentuk sinyanya  $x(t)$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

Gambar 2.16 Persamaan dari bentuk sinyanya  $x(t)$

FFT dalam pengolahan isyarat meliputi Periode dan frekuensi:

#### 1. Periode

Secara umum periode didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk sebuah isyarat atau gelombang mencapai suatu gelombang penuh. dan dapat menentukan nilai periodesitasnya. Perlu dicermati bahwa pengertian ini berlaku untuk isyarat monokromatis, isyarat yang dimaksud adalah gelombangnya bersifat tunggal, pasti memiliki sebuah priode. Dengan demikian isyarat itu dikenal dengan istilah priodis, pengamatan dapat dilakukan dengan memantau gelombang kita dapat mengetahui nilai nilai yang terkandung dalam isyarat serta periodenya.

#### 2. Frekuensi

Ada periode, maka ada frekuensi diartikan sebagai jumlah gelombang yang terjadi dalam 1 detik. Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari

waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (second) akan menjadi Hertz (1-per second) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum. Yang dikenal dengan spektrum frekuensi. Pengertian frekuensi ini juga berlaku untuk gelombang monokromatis.

### 2.8.1 Analisa Rotor

Salah satu yang utama kekuatan Motor Current Signature Analisis (MCSA) adalah analisa rotor. Broken rotor bar, static eccentricity dan dynamic eccentricity adalah tiga jenis dasar issue motor yang dapat dianalisa dengan menggunakan metode MCSA. Broken rotor bar biasanya ditemukan ketika slip frekuensi sidebands disekitar line frekuensi. Standar peraturan dari pengalaman adalah kesalahan itu dideteksi ketika sidebands ini ditemukan melebihi -35db atau sering dikenal sebagai “35db menurun”.

Sideband yang ditemukan pada analisa rotor ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$F_{sideband} = (F_{synchronous\ speed} - F_{running\ speed}) \times poles \dots\dots\dots(2.1)$$

$$F_{running\ speed} = \frac{Rotary\ per\ minute\ (Rpm)}{60\ second/min} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$F_{slip} = \frac{2 \times line\ frequency}{poles} \dots\dots\dots(2.3)$$

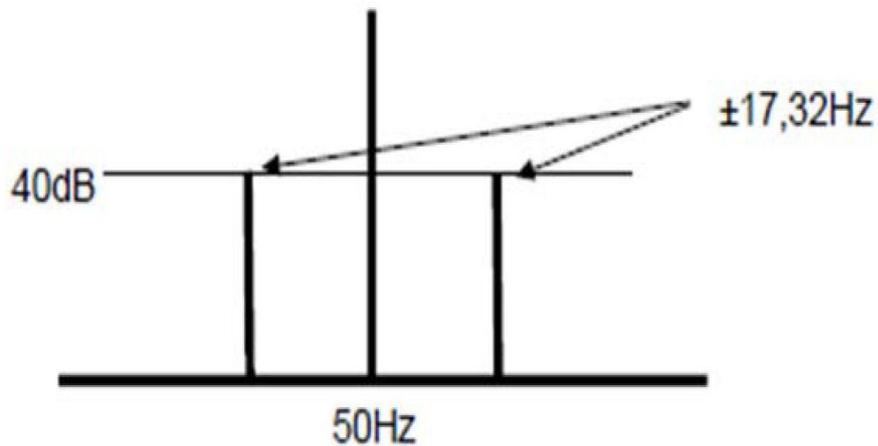
Dengan:

$F_{sideband}$  = Frekuensi sideband yang timbul (Hz)

$F_{synchronous\ speed}$  = Frekuensi slip motor

$F_{running\ speed}$  = Frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

Poles = jumlah kutub pada motor induksi



Gambar 2.17 Broken rotor bar pada low frequency

Jika frekuensi sideband yang sebesar  $\pm 17.32$  Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 tersebut muncul pada puncak line frekuensi 50 Hz pada algoritma Fast Fourier Transform (FFT) dan bernilai  $-40$  db maka dapat ditentukan bahwa motor tersebut teridentifikasi adanya kerusakan rotor bar (rotor bar broken).

**STANDART**  
**Electrical Apparatus Service Association**

<b>54 dB</b>	<b>Normal</b>
<b>45 - 54 dB</b>	<b>Marginal Condition</b>
<b>40 - 45 dB</b>	<b>Monitoring</b>
<b>&lt; 40 dB</b>	<b>Dangerous</b>

Gambar 4.18 Standard dari EASA

Sumber : PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG

Selisih dB / Penguatan sinyal antara frekuensi puncak dan *side band* menurut EASA

- > 54 dB = Kondisi motor normal
- 45-54 dB = Kondisi motor *marginal condition* / kondisi secara umum, maka tindakan yang harus dilakukan adalah dilanjutkan pengecekan/*monitoring*
- 40-45 dB = Setidaknya ada satu broken rotor bar ( lakukan trending dan monitor terus )
- 40 dB Lebih dari satu broken rotor bar, maka direkomendasikan motor untuk dimatikan

### 2.8.2 Analisa Static eccentricity

Static eccentricity dapat ditemukan didalam spektrum frekuensi tinggi seperti pada gambar 2.12. Static eccentricity terjadi jika pusat frekuensi (Center frekuensi/CF) tidaklah mencapai puncak didalam spektrum tetapi disusun sebagai hasil perkalian antara running frekuensi (RF) dengan jumlah rotor bar (RB) pada motor induksi. Persamaan yang digunakan untuk menghitung terjadinya static eccentricity adalah sebagai berikut :

$$F_{\text{static eccentricity}} = (RB \times RF) \pm (N \times LF) \dots \dots \dots (2.4)$$

$$F_{\text{running speed}} = \frac{\text{Rotary per minute (Rpm)}}{60 \text{ second/min}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan :

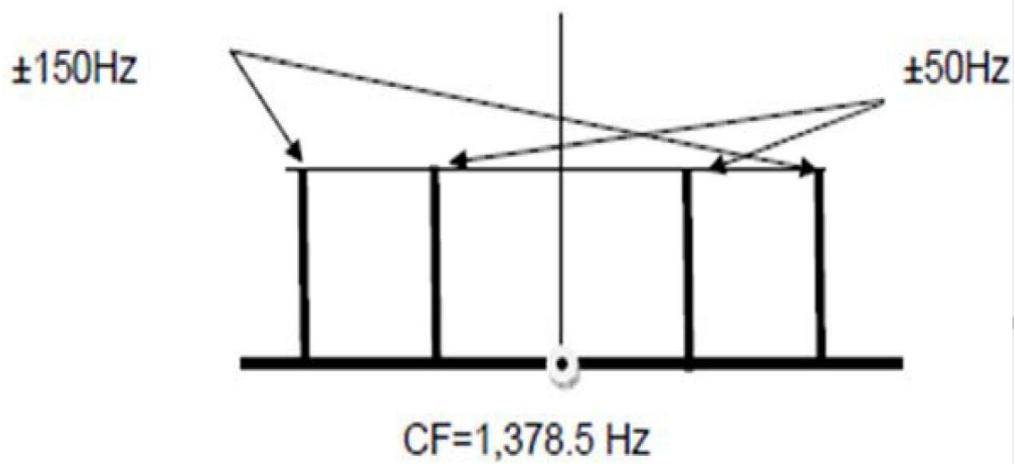
$F_{\text{static eccentricity}}$  = frekuensi sideband timbul akibat adanya eccentricity (Hz)

RF (Frunning speed) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

RB (Rotor Bar) = jumlah rotor bar pada motor induksi

LF (Line frekuensi) = frekuensi dasar (50 Hz)

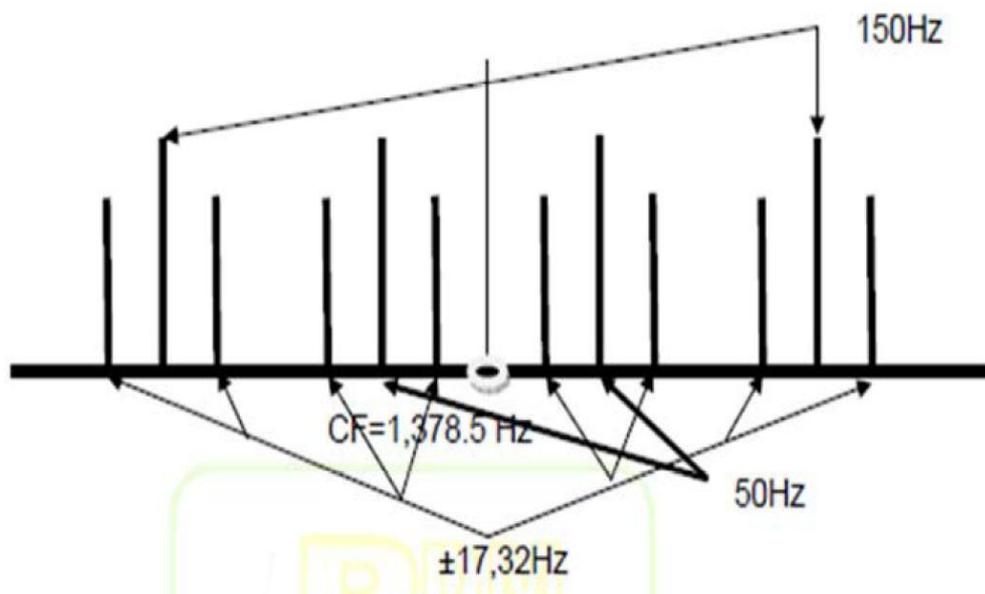
N = bilangan bulat integer



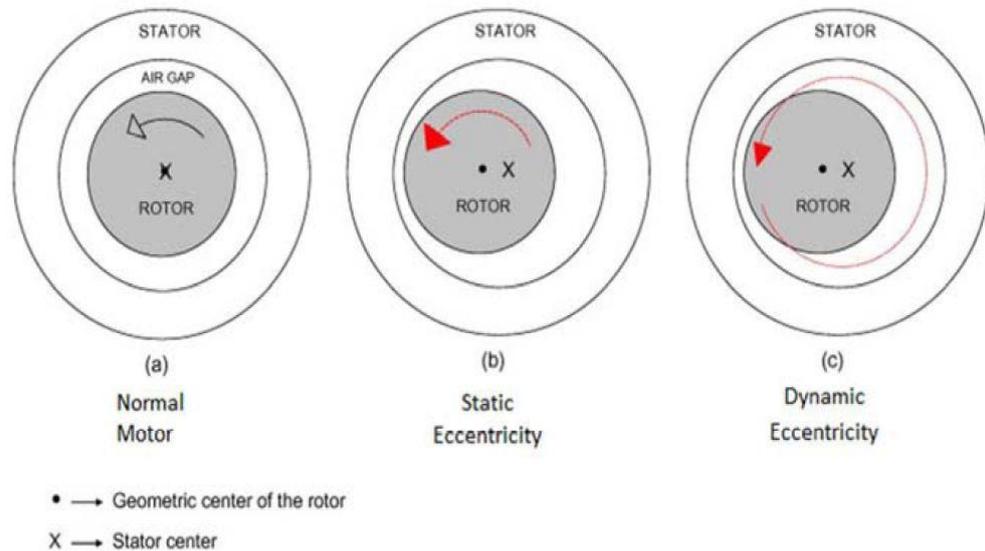
Gambar 2.19 Static eccentricity pada high frequency

### 2.8.3 Analisa Dynamic eccentricity

Dynamic eccentricity berbeda dengan static eccentricity, pada keadaan dynamic eccentricity akan ada juga running speed sideband disekitar static eccentricity sideband dari frekuensi dasar seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.20 Dynamic eccentricity dengan sidebandnya



Gambar 2.21 Pola Eccentricity pada rotor dan stator

#### 2.8.4. Analisa stator

Permasalahan stator winding ditemukan dengan mengidentifikasi stator slot passing frequencies (SP). Center frekuensi (CF) pada analisa stator dapat ditentukan dengan perkalian banyaknya slot stator dengan running speed. Permasalahan ditemukan ketika sideband nampak disekitar slot passing (SP) pada center frekuensi (CF).

$$F_{\text{stator slot}} = (RF \times \text{Stator slot}) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$F_{\text{running speed}} = \frac{\text{Rotary per minute (Rpm)}}{60 \text{ second/min}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan :

$F_{\text{stator slot}}$  = frekuensi sideband yang muncul akibat stator

Stator slot = banyaknya slot stator pada winding motor induksi

RF (Frunning speed) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

Apabila center frekuensi (CF) mempunyai sideband yang muncul pada line frekuensinya maka adanya indikasi kerusakan pada mekanik stator (mechanical

stator), sedangkan bila sideband muncul pada running speednya maka terindikasi adanya penurunan atau degradasi pada elektrik stator (stator electrical).

### 2.8.5 Analisa bearing

Untuk menganalisa kerusakan sebuah bearing pada motor induksi dengan metode MCSA, terlebih dahulu kita harus memperoleh pabrikan bearing yang sesuai dengan ukuran kemudian memperoleh jenis bearing yang mana dapat diperoleh dari cataog pabrik atau secara langsung melalui MCSA perangkat lunak ATPOL'S. Jenis ini sudah dilengkapi dengan :

1. Ball pass Outer Race (BPOR)
2. Ball pass Inner Race (BPIR)
3. 2x Ball spin Frequency (2x BSF)
4. Cage Frequency (FTF)

Frekuensi bearing ditemukan seperti masing-masing running frekuensi dengan line frekuensi sideband. Harmonisa untuk frekuensi bearing dapat ditemukan oleh perkalian masing-masing frekuensi bearing yaitu bilangan bulat dengan line frekuensi (LF) dengan sideband disekelilingnya.

$$F_{bearing} = (BPOR \times RF \times N) \pm Lf \dots \dots \dots (2.8)$$

$$F_{runningspeed} = \frac{Rotary \ per \ minute \ (Rpm)}{60 \ second/min} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan :

Fbearing = frekuensi sideband yang muncul pada masing-masing bearing (Hz)

BPOR = Ball pass Outer Race

RF (Frunning speed) = frekuensi motor per detik selama motor beroperasi (Hz)

LF (Line frekuensi) = frekuensi dasar (50 Hz)

N = bilangan bulat integer

### 2.8.6 Analisa Arus tidak seimbang (*Unbalance current*)

Mechanical unbalance ditemukan dengan menggunakan rumus yang ada di bawah ini, prosentase arus tidak seimbang di peroleh dari I maksimum di kurang I rata rata dimana I rata rata di peroleh dari penjumlahan arus R,S,T kemudian di bagi tiga maka di peroleh I rata rata kemudian di bagi I rata rata dan di kali 100 % maka hasilnya prosentase arus tidak seimbang akan di peroleh

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{I \text{ Maximum deviation} - I \text{ average}}{I \text{ average}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\% \text{ Unbalance} = \frac{I \text{ Tertinggi} - I \text{ Rata-rata}}{I \text{ Rata-rata}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

Adapun alat atau teknologi yang digunakan dalam metode MCSA yaitu :

#### 1. Probe MCSA



Gambar 2.22 Probe MCSA

Sumber : PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG

*Probe* MCSA tersebut alat untuk mengukur arus listrik tanpa harus memutus rangkaian. Berbeda saat melakukan pengukuran arus listrik dengan multimeter yang harus memotong dan menghubungkan alat ukur pada rangkaian yang akan diukur.

### 1. CSi 2130

CSi 2130 dapat secara akurat mengukur dan mengumpulkan sinyal dari *system* atau peralatan. CSi 2130 dapat menambah kemampuan *predictive maintenance* dengan mengidentifikasi kesalahan sebelum kerusakan terjadi. CSi 2130 juga telah maju untuk analisis alat, kesalahan frekuensi untuk mengidentifikasi sumber dalam spectrum getaran. CSi 2130 secara otomatis. Untuk MCSA alat ini digunakan sebagai penampil gelombang dari *probe* MCSA dan pengukuran vibrasi.



Gambar 2.23 Front Panel CSi 2130

Sumber : PT PJB UBJ O & M PLTU REMBANG