

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Tiyono (2013) Meneliti tentang “Perancangan Setting Rele Proteksi Arus Lebih Pada Motor Listrik Industri”. Motor listrik harus memiliki standar proteksi yang berdasarkan standar PUIL, standar ini dapat digunakan peralatan proteksi listrik dengan fungsi utama pengaman dari arus lebih dan beban lebih. Pada perancangan ini menggunakan Software ETAP 6.0.0 yang berfungsi sebagai gambaran kerja motor dan pengamanan motor melalui arus yang mengalir pada beban. Sedangkan relay beban lebih, relay arus lebih dan MCB proteksi motor digunakan sebagai pengaman pada perancangan alat ini. Perancangan ini menghasilkan suatu peralatan pengaman motor yang benar, aman, dan berkualitas dengan standar perancangan untuk daya motor listrik industri.

Kosa Shantia (2014) “Analisis Pemanfaatan Energi Listrik Pada Mesin-Mesin Produksi Divisi Pabrikasi Di PT Inka Madiun”. Pengurangan penggunaan beban-beban listrik merupakan salah satu solusi terbaik untuk melakukan penghematan energi listrik. Pada penelitian ini menghasilkan pengukuran suplai daya trafo yang merata dengan presentase ketidak seimbangan beban di bawah 20% serta motor listrik yang digunakan memiliki presentasi kelebihan suhu yang sangat rendah karena sistem memiliki rugi-rugi daya yang rendah.

Zuriman Anthony (2017) “Pengembangan Rangkaian Kendali untuk Mengoperasikan Motor Induksi 3-Fasa”. Rangkaian kendali pada motor induksi 3-fasa merupakan salah satu sistem yang harus dirancang dengan baik agar motor induksi 3-fasa dapat beroperasi dengan baik sesuai rencana. Saat ini, rangkaian kendali motor induksi 3-fasa juga telah dikembangkan agar motor dapat beroperasi dengan baik pada sistem tenaga listrik 1-fasa. Penelitian ini dimaksudkan untuk pengembangan sistem kendali motor induksi 3-fasa yang pernah dikemukakan.

Puger Honggowiyono (2005) “Sistem Pengamanan Motor Listrik 3 Fasa Pada Berbagai Gangguan”. Pada penelitian ini memiliki tujuan utama untuk mengembangkan sistem pengamanan pada instalasi 3 fasa untuk kendali motor listrik. Gangguan yang di maksud meliputi panas berlebih motor listrik, turun tegangan dan beban lebih. Penelitian dilakukan dengan cara pengukuran besaran listrik sistem dan sistem kerja pengaman saat mengendalikan motor listrik, meliputi pengaman tegangan masukan, pengaman beban dan pengaman control tegangan, dimana penelitian ini menghasilkan sistem kerja yang baik dengan sistem proteksi yang dapat mengamankan motor listrik yang dikendalikan.

Anugrah Fitrah (2016) “Evaluasi Kelayakan Instalasi Rumah Tangga Berdasarkan Ketentuan Puil 2000”. Instalasi listrik dapat diartikan sebagai seperangkat rangkaian yang dapat menghubungkan beberapa komponen penyusun yang dapat mengedalikan suatu beban listrik, sedangkan dalam perancangannya harus memenuhi standar yang ada. Di Indonesia standar yang berlaku adalah Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2000). Dari hasil evaluasi kebanyakan dari pemasangan instalasi dirumah – rumah tidak memasang kabel pbumian dengan benar serta tidak menggunakan komponen listrik yang berstandar nasioanal (SNI).

## **2.2 Pengertian Panel Distribusi Secara Umum**

Panel distribusi listrik merupakan sekumpulan komponen listrik yang saling berhubungan dimana sistem ini akan membentuk suatu kesatuan yang dapat mengendalikan, mendistribusikan dan memonitoring beban listrik. Panel distribusi listrik pada umumnya memiliki fungsi pemutus arus listrik dan pembagian sumber energy listrik. Suatu panel distribusi listrik pada umumnya terbuat dari bebrapa kepingan almunium yang di buat sesuai indek proteksi dan untuk sistem rangkaian terbagi atasangkaian utama sebagai penghubung utama ke beban listrik serta rangkaian kontrol sebagai pengendali beban.

Pengontrolan suatu beban listrik, khususnya pada bangunan industri memiliki dua kendali pertama kendali manual sebagai media untuk perawatan dan monitoring sistem kerja alat, kendali manual motor listrik pada umumnya menggunakan komponen saklar tekan, saklar pemisah, dan saklar sejenisnya yang memiliki kerja maual. Sedangkan untuk control otomatis motor listrik menggunakan saklar magnetic sebagai kontak utama dan relay sebagai kontak bantu dengan time delay relay sebagai komponen penunda waktu. Untuk pengaman motor listrik dapat digunakan circuit breaker sebagai pengaman rangkaian utama dan thermal overload sebagai pengaman utama motor listrik.

Panel distribusi listrik harus dijalankan sesuai dengan beban yang dikendalikan khususnya untuk panel kendali motor listrik harus memiliki indek proteksi panel yang di sesuaikan dengan jenis bangunan, penempatan panel, jarak panel dengan beban dan kerangka komponen yang mudah dijangkau untuk mempermudah pelayanan dan pengoperasiannya agar pemeliharaan dan perbaikan dapat dilakukan dengan mudah, panel harus ditempatkan pada ruangan yang luas dan tidak memiliki gangguan oleh benda-benda disekitarnya khususnya benda padat dan benda cair yang dapat mengakibatkan kerusakan panel tersebut.

Salah satu faktor keandalan penyaluran energi listrik pada suatu panel distribusi listrik yaitu panel yang dimaksud dapat mengendalikan beban listrik secara tepat dengan rugi-rugi daya seminimal mungkin dan turun tegangan seminimal mungkin maka kontinuitas kerja panel dapat bertahan lama dan komponen penghubungnya memiliki umur yang lebih panjang.

Panel distribusi listrik memiliki beberapa fungsi dan kegunaan yang dikelompokkan sesuai dengan proses kontrol dan pelayanannya. Fungsi panel dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam yaitu :

1. Penghubung dan Pembagi

Salah satu fungsi panel distribusi listrik yaitu untuk menghubungkan suatu panel utama ke sub-sub panel dengan pembagian tegangan menggunakan sirkuit breaker .selain penghubung antar panel, fungsi ini juga dapat diartikan sebagai penyalur dan pembagi energi listrik ke masing-masing cabang panel.

## 2. Pengaman

Salah satu fungsi panel distribusi listrik yaitu untuk proteksi beban listrik dari arus lebih, beban lebih, tegangan sentuh dan hubung singkat, selain untuk pengaman beban juga berfungsi sebagai pengaman bagi pengguna dan orang di sekitarnya. Salah satu fungsi ini yaitu dapat direalisasikan dengan panel MCC.

## 3. Penyuplai

Salah satu fungsi panel distribusi listrik yaitu untuk mensuplai suatu beban listrik dari sumber tegangan listrik utama hal ini dimaksudkan agar beban mendapatkan suplai energy listrik yang sesuai dengan spesifikasi beban listrik yang digunakan.

## 4. Pengontrol

Salah satu fungsi panel distribusi listrik yaitu untuk mengendalikan suatu beban listrik dengan tujuan utama mengendalikan beban secara otomatis sehingga dapat meringankan pekerjaan manusia dalam mengoperasikan alat-alat listrik yang digunakan. Panel pada umumnya digunakan pada suatu bangunan untuk mengendalikan instalasi tenaga dan instalasi penerangan yang akan dikontrol pada suatu tempat.

### 2.3 Teori Dasar Penentuan Spesifikasi Komponen Panel

#### 1. Penentuan Arus Nominal Beban

Arus nominal beban merupakan landasan utama keandalan sistem dengan nilai kemampuan hantar arusnya. Arus nominal suatu rangkaian listrik dapat di ketahui dengan rumus sebagai berikut :

$$I_n = \frac{P}{V} \cos \varphi$$

#### 2. Penentuan KHA Penghantar

Untuk menentukan Kemampuan Hantar Arus (KHA) dapat dilakukan dengan landasan arus nominal rangkaian yang mensuplai beban dengan nilai kurang dari 125% arus penuh rangkaian.

Untuk menghubungkan komponen yang berjarak jauh digunakan penghantar dengan ukuran sekurangnya sama dengan arus nominal rangkaian sehingga dapat meminimalisir turun tegangan yang melebihi sistem serta resistansi keluaran yang menuju ke dua atau lebih beban listrik harus mempunyai kemampuan hantar arus minimal sama dengan arus beban terbesar dari hubungan tersebut atau ditambah dengan safety factor sebesar 125%. Selanjutnya dapat dipilih ukuran penghantar yang akan digunakan sesuai dengan tabel ukuran KHA kabel.

Kemampuan hantar arus utama dan busbar dapat menentukan menggunakan rumus sebagai berikut:

KHA = Kemampuan hantar arus cabang berdasarkan rating arus ditambah dengan nilai arus nominal terbesar beban pada cabang lainnya.

### 3. Penentuan Kemampuan hantar arus pengaman circuit breaker

Circuit breaker dapat digunakan sebagai pengaman dan pemutus tegangan utama, setiap circuit breaker memiliki spesifikasi yang harus disesuaikan dengan besarnya beban maksimal yang diampu, Kemampuan Hantar Arus circuit breaker pada suatu rangkaian listrik dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Rating MCB} = 1,25 \times I_n \text{ beban}$$

### 4. Penentuan KHA Saklar Masuk

Kemampuan Hantar Arus saklar masuk juga harus memiliki nilai yang standar, standar yang dimaksud yaitu PUIL dengan presentase 1,15% dari arus nominal rangkaian. Kemampuan Hantar Arus ini dapat diketahui dengan rumus sebagai berikut:

$$I_n \text{ Saklar} = 1,15 \% \times I_n \text{ beban}$$

### 5. Penentuan Turun Tegangan

Faktor utama yang dapat mempengaruhi terjadinya turun tegangan antara lain:

- a. Jika resistansi jarak antara beban utama yang memiliki jarak yang terlalu jauh.
- b. Jika luas penampang penghantar terlalu kecil atau tidak sesuai.

Turun tegangan pada suatu instalasi listrik harus memiliki penerangan dengan nilai presentase 2% dan untuk tenaga sebesar 5% yang di ijin kan sesuai Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) tahun 2000. Jadi turun tegangan yang diijinkan sebesar  $2\% \times 220\text{ V} = 4,4\text{ Volt}$  dan untuk tenaga sebesar  $5\% \times 220\text{ V} = 11\text{ Volt}$ .

#### 6. Penentuan Jenis Proteksi Arus Bocor (Grounding)

Sesuai dengan peraturan umum instalasi listrik pengamanan pembumian dapat digunakan elektroda pertanahan yang memiliki nilai tahanan sesuai dengan rumus sebagai berikut:

$$I_a = K \times I_n$$

## 2.4 Pengertian Panel MCC

Motor Control Center (MCC) adalah suatu media pengendali motor listrik dengan fungsi utama proteksi sistem kerja motor listrik itu sendiri pada umumnya MCC digunakan pada bangunan industri yang memerlukan pengendalian motor listrik secara otomatis demi mempermudah dalam pengoperasiannya. Panel MCC juga mempunyai fungsi sebagai pengamanan beban terhadap arus lebih, beban lebih, dan hubung singkat.

Motor Control Center mempunyai dua tingkatan pensuplay tegangan

1. Motor Control Center bekerja pada tegangan rendah, dimana tegangan yang dimaksud maksimum adalah 600 V.
2. Motor Control Center bekerja pada tegangan menengah, dimana tegangan yang dimaksud maksimum sebesar 7,2 KV.

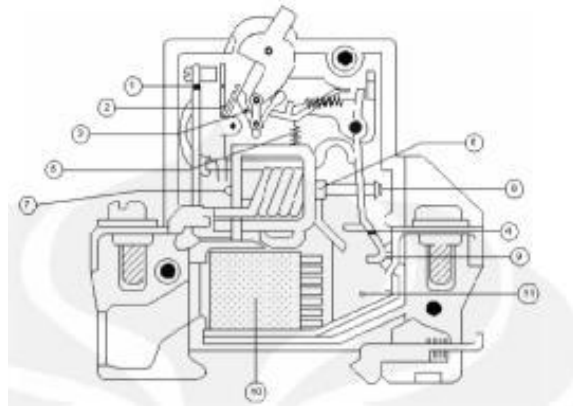
Untuk mengontrol motor listrik pada tegangan rendah peralatan utama yang terdapat pada Motor Control Center antara lain

1. Cicuit Breaker.

Circuit Breaker (CB) merupakan salah satu komponen listrik yang memiliki fungsi untuk mengamankan instalasi dan beban listrik dengan sistem arus lebih dan hubung singkat melalui perantara bimetal dan elektromagnetik.

Circuit Breaker memiliki sistem pengaman yang digunakan untuk :

- a. Pengaman arus lebih dan kosleting.
- b. Menghubungkan dan memutus rangkaian listrik.
- c. Pengaman komponen listrik pada rangkaian tersebut.



Gambar 2.1 Desain MCB

Keterangan gambar :

1. lengan Bimetal
2. lengan Penekan
3. batang Pemutus Kontak
4. batang Kontak yang bergerak
5. Per Penarik Kontak
6. kumparan coil
7. lengan Pendorong
8. lengan Penarik Kontak
9. Kontak Tetap
10. Kisi Pemadam Busur Api
11. Plat Penahan dan Penghubungr Busur Api

Jenis pengamanan circuit breaker memiliki sistem kerja dengan memutus arus listrik yang menuju ke suatu beban saat terjadinya arus lebih dan beban lebih sesuai dengan arus nominal rangkaian. Circuit breaker memiliki beberapa macam dalam sistem proteksinya sebagai berikut :

a. Pemutusan Secara Thermal

Pada kondisi ini circuit breaker akan bekerja jika rangkaian yang diamankan mengalami gangguan arus lebih secara terus menerus. Batang bimetal akan berpindah posisi atau melengkung secara perlahan sehingga kontak akan terputus karena adanya pemanasan berlebih.

b. Pemutusan Secara Elektromagnetik

Pada kondisi ini circuit breaker akan bekerja rangkaian yang diamankan mengalami gangguan konsleting secara tidak terduga, sehingga coil trip akan bekerja serta batang pendorong akan mengerjakan batang penekan, dimana batang penarik kontak akan mengerjakan lengan kontak sehingga pegas penarik akan terlepas.

2. Magnetic Contactor.

Magnetic Contactor atau sering disebut kontaktor magnetic merupakan salah satu komponen listrik yang berfungsi untuk memutus dan menghubungkan suatu rangkaian listrik dengan sistem kerja magnetic. Komponen ini termasuk peralatan listrik yang aman jika digunakan sebagai pemutus dan penghubung secara terus menerus pada rentang arus dibawah 1000A. Pada umumnya komponen ini digunakan sebagai control beban pada dunia industri untuk motor listrik, pemanas, dan penerangan .

Untuk pengamanan suatu motor listrik dengan beban lebih dapat digunakan komponen pendukung seperti TOR. Kontaktor magnet dapat bekerja secara normal apabila diberikan tegangan 85% sampai 110% dari tegangan permukannya. Apabila lebih kecil dari 85% kontaktor akan bergetar atau bunyi, apabila lebih besar dari 110% kontaktor rusak.



Magnetic contactor terdiri dari beberapa kontak utama dan kontak bantu yang dapat berpindah posisi dari keadaan terbuka ke keadaan tertutup dan sebaliknya. Berikut merupakan kontak-kontak pada magnetik contactor:

a. Normally Open (NO)

Kontak NO merupakan suatu kontak dengan kondisi awal atau terbuka, dimana saat kontak ini bekerja maka kondisi kontak ini akan berada pada kondisi sebaliknya atau tertutup. Dengan kata lain fungsi utama kontak ini adalah sebagai suatu media penghubung suatu aliran arus listrik. Kontak ini akan bekerja sesuai dengan sistem kerja koil kontaktor magnetik dimana lebih rincinya saat koil kontaktor magnetik tidak mendapatkan suplai energi listrik maka kontak normally open ini akan pada kondisi terbuka sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik dan saat koil kontaktor magnetik mendapatkan suplai energi listrik maka kontak normally open ini akan tertutup sehingga dapat mengalirkan arus listrik.

b. Normally Close (NC)

Kontak Normally Close merupakan suatu kontak dengan kondisi awal atau tertutup, dimana saat kontak ini bekerja maka kondisi kontak ini akan berada pada kondisi sebaliknya atau terbuka. Dengan kata lain fungsi utama kontak ini adalah sebagai suatu media pemutus suatu aliran arus listrik. Kontak ini akan bekerja sesuai dengan sistem kerja koil kontaktor magnetik dimana lebih rincinya saat koil kontaktor magnetik tidak mendapatkan suplai energi listrik maka kontak Normally Close ini akan pada kondisi tertutup sehingga dapat mengalirkan arus listrik dan saat koil kontaktor magnetik mendapatkan suplai energi listrik maka kontak Normally Close ini akan terbuka sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik.



Gambar 2.2 Magnetic Contactor

### 3. Thermal Overload Relay.

Thermal overload relay merupakan salah satu peralatan listrik yang pada umumnya di gunakan sebagai pengaman pada suatu beban-beban listrik induksi dengan arus nominal beban yang besar. Komponen ini memiliki fungsi utama sebagai pengaman terhadap arus berlebih pada suatu beban motor listrik, dimana saat terjadi arus lebih komponen ini akan memutus aliran arus yang menuju ke beban motor listrik tersebut sesuai dengan rating arus yang ada.



Gambar 2.3 Thermal Overload Relay

Thermal overload relay dapat mengamankan suatu rangkaian 3 fasa dengan memutus ketiga fasanya, komponen ini terdapat dua jenis sistem kerjanya, pertama menggunakan bimetal sebagai sensor arus lebih dengan indikasi cara kerja berdasarkan pemanasan. Kedua menggunakan sistem elektromagnetik sebagai sensor arus lebih dengan cara kerja indikasi magnetic pada kumparanya.

Komponen ini juga dapat mendeteksi saat salah satu atau lebih fasa yang dikendalikan lepas atau hilang dengan ketentuan sistem tidak akan langsung memutus dengan jeda waktu atau persentasi hilang tegangan sesuai dengan spesifikasi komponen TOR yang digunakan. Thermal overload relay memiliki sistem pemasangan yang mudah dengan cara pemasangan secara langsung dengan kontaktor magnetik atau pun secara terpisah dengan kontaktor magnetiknya, tetapi pada umumnya komponen ini dipasang pada hubungan antara magnetic contactor dengan beban listrik atau motor listrik. Penentuan spesifikasi komponen ini didasarkan pada arus nominal beban yang akan diamankan dengan rating kelas pemutus sesuai dengan motor listrik yang digunakan juga.

#### 4. Time delay Relay.

Time delay Relay merupakan komponen listrik yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung rangkaian atau beban listrik secara otomatis, pada umumnya Time delay Relay memiliki 8 kontak utama dengan 2 kontak sebagai media masukan sumber energy listrik. Time delay Relay memiliki kontak bantu yang sama dengan kontaktor magnetik dengan kontak normally open dan normally close. Kontak ini juga memiliki cara kerja yang sama dimana pada Time delay Relay perpindahan kontakannya sesuai dengan rentang waktu yang telah di tetapkan. Komponen ini serig digunakan untuk pengendalian secara otomatis dengan maksud agar mempermudah pengopraiannya.



Gambar 2.4 Time Delay Relay

## **2.5 Pengertian Motor Listrik 3 fasa**

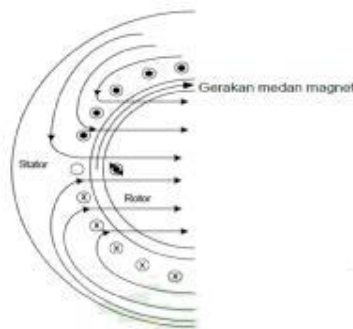
Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik (ac) dimana putaran rotornya tidak sama dengan putaran medan putar pada stator, dengan kata lain putaran rotor dan putaran medan pada stator terdapat selisih putaran yang disebut slip. Motor induksi memiliki konstruksi yang baik dengan harga murah, mudah dalam pengaturan kecepatan, memiliki kestabilan dalam beban berlebih dan mempunyai efisiensi yang cukup tinggi. Mesin induksi merupakan salah satu mesin ac yang banyak digunakan dalam industri skala besar atau kecil serta dalam rumah tangga, hal ini disebabkan karena karakteristik hamper sesuai dengan kebutuhan industri yang kaitannya dengan harga, kesempurnaan, pemeliharaan dan kestabilan kecepatan.

Pada umumnya, mesin induksi yang disebut asinkron hanya memiliki satu suplai tenaga yang mampu mengeksitasi belitan stator. Di perindustrian, motor ac yang paling banyak digunakan adalah motor induksi tiga fasa karena memiliki keuntungan seperti sistem yang sederhana dan kuat, biaya terjangkau, memiliki efisiensi tinggi pada kondisi kerja normal dan perawatan yang mudah. Akan tetapi, kerugian pada motor induksi tiga fasa ini tidak memiliki kecepatan yang bervariasi tanpa merubah efisiensi, memiliki kecepatan yang tergantung pada beban dan kekurangan pada torsi start.

## **2.6 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa**

Motor induksi merupakan komponen listrik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik ke bentuk energi mekanik. Pengubahan energi ini bergantung pada keberadaan fenomena alami magnetik, medan listrik, gaya mekanis dan gerak. Apabila belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka belitan akan mengalirkan arus yang menghasilkan medan magnet dimana medan berputar dengan kecepatan sinkron ( $n_s$ ). Medan magnet ini akan memotong belitan rotor, sehingga belitan akan di induksikan tegangan seperti halnya tegangan dalam lilitan sekunder transformator yang oleh fluksi akan menghasilkan arus pada belitan primer.

Rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup, baik melalui cincin ujung maupun tahanan luar. Tegangan yang dihasilkan oleh induksi pada rotor akan mengalirkan arus yang berada dalam medan magnet dimana arus tersebut dihasilkan oleh stator, sehingga belitan rotor akan menghasilkan gaya ( $F$ ). Gaya ini akan menghasilkan Torsi ( $T$ ) dan jika torsi yang dihasilkan lebih besar dari torsi beban, maka rotor akan berputar dengan kecepatan  $n_s$  yang searah dengan medan putaran stator.



Gambar 2.5 Penampang Rotor dan Stator yang Memperlihatkan Medan Magnet dalam Celah Udara

Pada arah fluksi dan gerak yang ditunjukkan gambar diatas, penggunaan aturan tangan kanan *fleming* bahwa arah arus induksi dalam konduktor rotor menuju pembaca. Ketika kondisi seperti itu, dengan konduktor yang mengalirkan arus berada dalam medan magnet, gaya pada konduktor mengarah ke atas karena medan magnet dibawah konduktor lebih kuat daripada medan di atasnya. Konduktor rotor yang berdekatan dalam medan stator juga mengalirkan arus dalam arah seperti pada konduktor yang ditunjukkan, serta mempunyai suatu gaya kearah atas yang dikerakan pada mereka.

Kemudian setengah siklus berikutnya, arah medan stator akan dibalik tetapi arus rotor juga akan dibalik sehingga gaya pada rotor tetap ke atas. Demikian pula konduktor dibawah kutub-kutub medan stator lain akan memiliki gaya yang semuanya cenderung memutar rotor dengan searah jarum jam. Apabila kopel yang dihasilkan cukup besar untuk mengatasi kopel beban yang menahan, motor akan melakukan percepatan searah jarum jam atau dalam arah yang sama dengan perputaran medan magnet stator.

## 2.7. Pengasutan Motor Induksi

Untuk motor induksi 3 fasa yang memiliki kapasitas besar pada umumnya harus dilakukan suatu cara pengasutan motor yang tepat dan aman. Ketika motor listrik bekerja dalam kondisi awal akan menghasilkan arus yang besar dengan waktu yang sangat singkat hal tersebut akan mengakibatkan lonjakan tegangan pada rangkain yang digunakan. Gangguan tersebut dapat mengganggu stabilitas rangkaian secara keseluruhan ataupun akan mengakibatkan pemutusan suplai energy listrik yang menyebabkan kerugian.

Berikut merupakan macam-macam pengasutan motor induksi secara aman pada umumnya:

1. Langsung/*Direct on Line* (DOL)
2. Melalui saklar bintang-segitiga (*Start-Delta*)
3. Melalui *Soft Starter*, dan Melalui *Auto Trafo*

## 2.8. Pengertian Besaran Listrik

1. Frekuensi

Frekuensi merupakan jumlah kemunculan suatu kejadian yang berulang pada suatu jangka waktu tertentu. Frekuensi didefinisikan sebagai jumlah periode gelombang yang terjadi selama 1 detik. Mengacu pada SI, satuan frekuensi adalah Hertz yaitu jumlah siklus per detik. Nama ini diberikan sebagai penghargaan kepada Heinrich R. Hertz atas kontribusinya pada bidang gelombang elektromagnetik. Pada sistem tenaga listrik, istilah frekuensi diasosiasikan dengan frekuensi tegangan dan arus listrik. Frekuensi ini diperoleh dari kombinasi jumlah putaran dan jumlah kutub listrik pada generator di pembangkit listrik.

Amerika Utara, Westinghouse memilih mengoperasikan generator buaatannya pada 133 Hz, sementara Thompson-Houston (sebelum nanti namanya berubah menjadi General Electric) menggunakan generator yang beroperasi menghasilkan 125 Hz. Di Britania Raya, frekuensi sistem bervariasi mulai dari 83 Hz hingga 133 Hz. Frekuensi yang beroperasi di eropa daratan juga bervariasi mulai dari 30 Hz hingga 70 Hz.

AEG dari Jerman menggunakan frekuensi 40 Hz untuk mentransmisikan listrik sejauh 175 km ke Frankfurt, MFO dari Swiss menggunakan frekuensi 50 Hz untuk mentransmisikan listrik ke pabriknya, sementara Ganz dari Hungaria menggunakan 42 Hz untuk melayani konsumen beban penerangannya. Standar peraturan menteri energi dan sumber daya mineral no.37 tahun 2008 nilai “frekuensi nominal 50 Hz, dan tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama waktu keadaan darurat dan gangguan, frekuensi Sistem diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar dari operasi

## 2. Tegangan

**Tegangan listrik** atau terkadang disebut dengan *Voltase* merupakan perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam suatu lintasan listrik. Besaran ini mengukur perbedaan potensial dari sebuah medan listrik dalam sebuah konduktor, sehingga mengakibatkan adanya aliran listrik. Tegangan listrik dapat diartikan sebagai tegangan rendah, menengah, dan tinggi tergantung dengan perbedaan potensial listriknya. Tegangan listrik dinyatakan dalam satuan *volt*.

## 3. Arus

**Arus listrik** merupakan jumlah muatan listrik yang mengalir melewati suatu titik pada lintasan listrik setiap satuan waktunya. Arus listrik memiliki satuan *Ampere* atau *Coulomb* per detik. Dalam lintasan arus searah pada umumnya dapat diasumsikan resistansi terhadap arus listrik adalah konstan, sehingga besarnya arus yang mengalir dalam lintasan tersebut bergantung pada tegangan dan tahanan beban yang digunakan.

## 4. Daya

Daya didefinisikan sebagai energi yang digunakan untuk melakukan usaha. Sedangkan daya listrik merupakan kecepatan aliran energi listrik pada suatu lintasan listrik dalam satuan waktu. Dalam Satuan Internasional, daya listrik dinyatakan dalam satuan *Watt* atau *Joule* per detik.

Dibawah ini merupakan pengelompokan daya listrik dengan batasan pembahasan hanya pada listrik bolak-balik (AC), yaitu :

a. Daya Aktif

Daya nyata merupakan energy listrik yang dibutuhkan suatu beban resistif, dimana daya nyata ini menunjukkan adanya aliran energi dari pembangkit listrik menuju beban untuk diubah menjadi energi liannya. Satuan daya aktif adalah *Watt*.

b. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan energy listrik yang dibutuhkan dalam pembangkitan medan magnet di kumparan-kumparan beban induktif. Daya reaktif diserap oleh beban-beban induktif, namun beban kapasitif yang menghasilkannya. Daya reaktif timbul akibat adanya medan magnet pada suatu motor listrik pada bagian kumparan stator dimana akan timbul indikasi medan magnet yang tercipta pada komponen pada bagian rotor motor listrik. Satuan daya reaktif adalah *Volt-Ampere Reactive (VAR)*.

c. Daya Semu

Daya semu merupakan energy listrik yang dihasilkan antara hubungan tegangan efektif dan arus efektif dalam suatu lintasan. Daya semu pada umumnya merupakan besaran listrik yang digunakan sebagai parameter pada suatu instalasi listrik langganan PLN. Satuan daya nyata adalah *VA*.

5. Harmonik

Harmonik merupakan sebuah permasalahan yang saat ini harus segera diatasi. Hal ini dikarenakan harmonik dapat menimbulkan banyak efek negatif pada sistem kelistrikan, baik itu sisi ekonomi maupun peralatan itu sendiri. Pada saat ini hampir semua peralatan listrik bersifat non-linear, seperti lampu hemat energi, ballast lampu, motor listrik, inverter, dan lainnya.



Beban-beban non-linear tersebut penyebab terjadinya distorsi terhadap gelombang pada saluran daya listrik, padahal gelombang tegangan dan gelombang arus yang disalurkan serta dihasilkan dalam sistem listrik yang ideal adalah gelombang sinusoidal murni. Definisi dari harmonik itu sendiri merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik akibat adanya distorsi gelombang tegangan dan gelombang arus. Gelombang akan terdistorsi karena adanya proses superposisi antara gelombang frekuensi dengan frekuensi dasar. Sehingga gelombang sinus pada sistem distribusi tidak lagi murni atau mengalami cacat riak-riak gelombang.

Distorsi gelombang arus dan tegangan ini akan membentuk gelombang-gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat bilangan harmonik dengan frekuensi dasarnya (f, 2f, 3f, dst). Gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dengan frekuensi dasar merupakan orde ke-h harmonik. Di Indonesia frekuensi dasar pada sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka untuk nilai frekuensi pada harmonik kedua (orde ke-2) yaitu 100 Hz, frekuensi harmonik ketiga (orde ke-3) 150 Hz dan seterusnya.

a. *Total Harmonic Distortion (THD)*

Total harmonic distortion (THD) merupakan sebuah ukuran harmonik yang paling umum digunakan untuk menunjukkan tinggi rendahnya kandungan dari jumlah harmonik pada suatu gelombang yang terdistorsi. THD merupakan sebuah perbandingan dari hasil penjumlahan komponen harmonik dengan komponen fundamental (dasar). THD dinyatakan dalam ukuran prosentase (%). Semakin besar nilai prosentase THD arus atau tegangan, maka akan semakin besar pula tingkat resiko kerusakan yang akan dialami oleh sistem kelistrikan. Untuk gelombang arus, nilai THD nya didefinisikan seperti berikut:

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

Sedangkan untuk gelombang tegangan, nilai THD nya didefinisikan sebagai berikut:

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

Keterangan:

$THD_V$  = Total harmonic distortion tegangan

$THD_I$  = Total harmonic distortion arus

$V_h$  = Nilai tegangan harmonik (V)

$V_1$  = Nilai tegangan fundamental (V)

$I_h$  = Nilai arus harmonik (A)

$I_1$  = Nilai arus fundamental (A)

h = arus dan tegangan harmonik ke-h

b. Batas Standar Harmonik

IEEE 519-1992, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, merupakan standar yang digunakan untuk THD. Standar IEC biasanya digunakan di Eropa dan standar ANSI dan IEEE banyak digunakan di Amerika. Standar yang digunakan pada penelitian ini adalah standar IEEE no 519 tahun 1992.

Nugroho S.S (2018) menyebutkan bahwa Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) adalah suatu lembaga internasional yang memiliki wewenang untuk melakukan riset dan penelitian dan ANALISIS untuk memberikan sebuah batas standar untuk dijadikan acuan referensi dalam bidang kelistrikan dan elektronika di beberapa negara.

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) menerangkan bahwa IEEE 519-1992 adalah praktik dan persyaratan yang direkomendasikan untuk mengendalikan harmonik dalam sistem tenaga listrik dan IEEE-519 lebih komprehensif dibandingkan dengan standar IEC.

Standar harmonik tegangan memiliki acuan berdasarkan nilai tegangan yang digunakan pada sebuah sistem, sedangkan untuk acuan harmonik arus adalah nilai perbandingan dari arus hubung singkat dengan arus yang bekerja pada beban.

c. Efek Harmonik

Banyak sekali efek dari harmonik pada sistem tenaga listrik, baik itu sisi penyuplai maupun pada sisi pengguna listrik. selain mengakibatkan adanya kerusakan atau gangguan pada sistem distribusi listrik, efek harmonik juga dapat menimbulkan pengaruh ekonomis yang sangat signifikan. dampak yang paling besar dari efek harmonik yaitu terjadinya peningkatan panas pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada *transformator*. Kenaikan panas ini disebabkan karena selain oleh arus pada frekuensi dasar, harmonik juga menghasilkan arus eddy (*Eddy current losses*). Peningkatan arus eddy ini juga dapat mengurangi umur *transformator*.

Berikut ini adalah beberapa efek yang ditimbulkan oleh harmonik:

- 1) Merusak kapasitor bank karena terjadinya resonansi harmonik.
- 2) Meningkatnya panas eddy current , menimbulkan fluk harmonik dan fluk density pada transformator meningkat.
- 3) Adanya arus pada kawat netral sehingga menyebabkan kabel menjadi panas.
- 4) Pemutus beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal, sehingga menimbulkan kegagalan proteksi.
- 5) Timbulnya getaran mekanik pada panel listrik yang merupakan getaran akibat resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi.

- 6) Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, sehingga bisa mengakibatkan kesalahan penunjukan kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.

## 6. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan.

Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. “Standar ANSI C84.1 – 1995 ketidak-seimbangan tegangan sistem tidak boleh melebihi 3% pada saat tidak dibebani, dan maksimal 6% untuk sistem yang dibebani.(ANSI C84.1-1995)

Jatuh tegangan secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Jatuh tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh tegangan ( $\Delta V$ ) pada penghantar semakin besar jika arus ( $I$ ) didalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar ( $R\ell$ ) semakin besar pula. Jatuh tegangan merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada dibawah tegangan nominal yang dibutuhkan.

Atas dasar hal tersebut maka jatuh tegangan yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya. Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen ( $V_r$ ) akan lebih kecil dari tegangan kirim ( $V_s$ ), sehingga tegangan jatuh ( $V_{drop}$ ) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan VR (voltage regulation) dan dinyatakan oleh rumus:

$$Vr = \left( \frac{Vs - Vr}{Vr} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

$V_r$  : Regulasi Tegangan

$V_s$  : Tegangan sisi pengirim/Tegangan sumber

$V_r$  : Tegangan sisi penerima/Tegangan penerima

#### 7. Rugi-rugi Daya (Losses)

Pengertian Losses yaitu sejumlah energi yang hilang dalam proses pengaliran energi listrik mulai dari Gardu Induk sampai dengan konsumen. Penyebab timbulnya losses yaitu: Panjang penghantar, kecilnya ukuran penampang penghantar, sambungan penghantar yang kurang baik, dan arus yang mengalir terlalu besar. Usaha untuk memperkecil rugi-rugi pada sistem distribusi tenaga listrik antara lain:

- a. Memilih ukuran penghantar, jenis penghantar yang sesuai untuk digunakan pada kondisi pembebanan jaringan tersebut dan sesuai dengan kemampuan hantar arus memperpendek jarak lintas jaringan
- b. Mengatur letak-letak beban sehingga jatuh tegangan pada titik-titik percabangan ke beban masih dalam batas yang diijinkan (untuk sistem 20KV, batas tegangan jatuh yang diijinkan pada kondisi beban penuh sebesar 4% untuk jaringan tegangan rendah) (SPLN 1978)

- c. Pemilihan penggunaan trafo distribusi yang sesuai dengan kondisi faktor beban pada lokasi yang dilayani, pemilihan kapasitas trafo distribusi pada suatu lokasi beban, biasanya berdasarkan besar beban yang akan dilayani serta pertimbangan kemungkinan penambahan (perluasan) pada lokasi yang bersangkutan. Dalam hubungannya untuk menjaga agar tegangan jatuh yang terjadi sampai pada konsumen sekecil mungkin, kapasitas trafo yang digunakan harus lebih besar dari kapasitas beban yang dilayani, sedangkan pemilihan lokasi penempatan dari trafo distribusi tidak terlalu jauh dengan masing-masing beban yang terpasang pada GTT tersebut sehingga tegangan yang jatuh pada konsumen dapat sekecil mungkin. Pemilihan tegangan pada jaringan ditentukan oleh besarnya beban dan jarak penyaluran dayanya.

Untuk mengetahui nilai *losses* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_R + \Delta P_S + \Delta P_T + \Delta P_N \text{ (Watt)}$$

Keterangan:

$\Delta P_{Total}$  = Power Losses Total

$\Delta P_R$  = Power Losses Fasa R

$\Delta P_S$  = Power Losses Fasa S

$\Delta P_T$  = Power Losses Fasa T

$\Delta P_N$  = Power Losses Netral

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I_{kR}^2 \text{ (W)}$$

Keterangan:

$\Delta P_R$  = Power Losses Fasa R

$\Delta P_R$  = Hambatan Kabel Fasa R

$I_{kR}^2$  = Besar Arus Harmonik pada Fasa R tiap orde

$$\Delta P_S = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I_{k_S}^2 (W)$$

Keterangan:

$\Delta P_S$  = Power Losses Fasa S

$R_{ph}$  = Hambatan Kabel Fasa S

$I_{k_S}^2$  = Besar Arus Harmonik pada Fasa S tiap orde

$$\Delta P_T = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I_{k_T}^2 (W)$$

Keterangan:

$\Delta P_T$  = Power Losses Fasa T

$R_{ph}$  = Hambatan Kabel Fasa T

$I_{k_T}^2$  = Besar Arus Harmonik pada Fasa T tiap orde

$$\Delta P_N = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I_{k_N}^2 (W)$$

Keterangan:

$\Delta P_N$  = Power Losses Fasa N

$R_{ph}$  = Hambatan Kabel Fasa N

$I_{k_N}^2$  = Besar Arus Harmonik pada Fasa N tiap orde

## 8. Faktor Daya

Faktor daya merupakan cosinus sudut yang dihasilkan dari perbandingan nilai daya aktif (P) dengan daya semu (S). Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya (Pf)} &= \frac{\text{Daya aktif (P)}}{\text{Daya semu (S)}} \\ &= \frac{kW}{kVA} \\ &= \frac{V \times I \times \cos \varphi}{V \times I} \\ &= \cos \varphi \end{aligned}$$

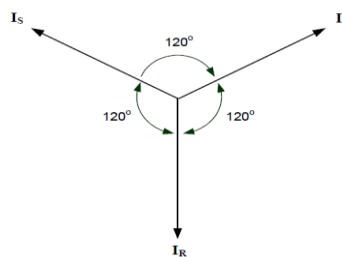
PT. PLN (persero) selaku penyedia daya listrik memberikan batasan terhadap faktor daya, untuk bangunan gedung diberi batas sebesar 0.85. jika faktor daya rata-rata dibawah angka tersebut maka dikenakan denda Penalti oleh PLN. Penyebab faktor daya rendah pada suatu sistem jaringan listrik adalah beban induktif. Pada suatu rangkaian induktif murni, arus akan tertinggal sebesar  $90^0$  terhadap tegangan, perbedaan sudut fase ini yang akan menyebabkan faktor daya untuk mendekati nol. Beban-beban listrik yang menyebabkan rendahnya faktor daya antara lain motor induksi, unit-unit *ballast* dari lampu, dan alat-alat las busur listrik.

#### 9. Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban atau unbalance merupakan kondisi dimana besarnya arus yang mengalir pada tiap fasa berbeda besarnya. Standar ANSI C84,1-1995 ketidak-seimbangan arus dapat dikatakan baik apabila  $\leq 20\%$ .

Suatu sistem kelistrikan pada sebuah bangunan dikatakan memiliki beban seimbang jika memenuhi dua hal berikut:

- Ketiga Vektor arus atau tegangan sama besar.
- Ketiga vektor arus saling membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.



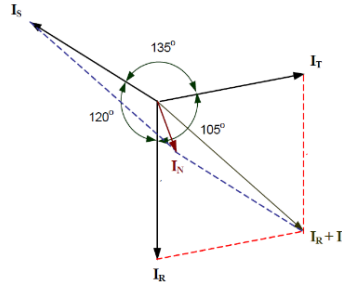
Gambar 2.6 Vektor Arus dalam Keadaan Seimbang

Ada 3 kondisi ketidakseimbangan beban yaitu:

- Ketika masing-masing vektor seimbang namun tidak membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.
- Ketika masing masing vektor tidak seimbang namun membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.



- c. Ketika masing masing vektor tidak seimbang dan tidak membentuk sudut  $120^0$  satu sama lain.



Gambar 2.7 Vektor Arus dalam Keadaan Tidak Seimbang

Akibat Ketidakseimbangan Beban menyebabkan adanya arus pada titik netral yang disebabkan oleh penjumlahan ketiga vektor arus ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ ) tidak sama dengan nol. Adanya arus netral menyebabkan rugi-rugi daya (losses).

Untuk menghitung nilai rugi rugi daya dapat digunakan rumus berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

Keterangan:

$P_N$  = Rugi-rugi daya pada penghantar netral (W)

$I_N$  = Arus pada Penghantar netral (Ampere)

$R_N$  = Hambatan penghantar (ohm)

Dalam menghitung besarnya ketidakseimbangan beban digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Dimana:

$$I_R = a \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_S = b \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}}$$

$$I_T = c \times I_{Rata-rata}$$

$$\text{Maka: } c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}}$$

Sehingga :

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \%$$