

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan penelitian ini, penulis mencari acuan sebagai sumber referensi dari penelitian terdahulu seperti penelitian berikut ini:

Muljadi, Samaan, Gevorgian, Li, & Pasupulati, (2010) yang berjudul “*Short Circuit Current Contribution for Different Wind Turbine Generator Type*” dalam penelitiannya meneliti 4 tipe WTG yang berbeda, *Type 1- Squirrel Cage Induction Generator, Type 2- Wound-Rotor Induction Generator with Variable External Rotor Resistance, Type 3- Double Fed Induction Generator, dan Type 4- Full-Converter Wind Turbine Generator*. Dari keempat tipe generator tersebut, peneliti menjelaskan bahwa gangguan arus *short circuit* terbesar adalah untuk gangguan tiga fasa.

Pada penelitian Tukiman, Khairul Handono, (2017) tentang “*Analisis Arus Hubung Singkat pada Sistem Catu Daya Listrik Iradiator Gamma*” membahas arus hubung singkat yang meliputi perhitungan impedansi sumber, impedansi saluran, impedansi transformator. Dari perhitungan didapat hasil : Impedansi sumber : $0,635 \Omega$, Impedansi saluran : $1,421 \times 10^{-3} \Omega$, Impedansi transformator : $3,546 \times 10^{-3} \Omega$ dan besarnya arus hubung singkat I_{sc} : 45,51 kA.

Penelitian Mäki, Repo, & Järventausta, (2014) yang berjudul “*Effect Of Wind Power Based Distributed Generation On Protection Of Distribution Network*” Pengaruh tipe generator pada kesalahan arus Implementasi unit generator memiliki efek yang besar pada jaringan pendistribusiannya dan dengan demikian tentang masalah perlindungan atau proteksinya juga. Arus gangguan oleh sinkron generator adalah yang terbesar dan disebabkan oleh perbedaan tipe generator, generator sinkron biasanya dapat memberi arus gangguan berkepanjangan.

Dari penelitian yang dilakukan oleh Erlich, Neumann, Shewarega, Schegner, & Meyer, (2013) dalam penelitiannya yang berjudul “*Wind Turbine Negative Sequence Current Control and its Effect on Power System Protection*” membahas tentang kontrol urutan negatif komponen arus hubung singkat yang berasal dari turbin angin dan efek yang terjadi pada sistem proteksi akibat adanya kontrol arus hubung singkat. Peneliti menjelaskan bahwa pada dasarnya akibat yang terjadi pada sistem proteksi ditentukan oleh kontrol konverter.

Berdasarkan penelitian terdahulu, gangguan terbesar yang terjadi adalah akibat dari adanya gangguan hubung singkat atau short circuit pada jaringan sistem. Maka dari itu penulis akan membahas tentang ANALISIS SISTEM PROTEKSI WIND TURBINE GENERATOR TYPE 1 GRUP BARAT (Studi Kasus Pada Plth Bayu Baru Bantul Yogyakarta) yang berfokus mengenai kajian ulang perhitungan sistematis perangkat proteksi pada jaringan sistem dan membandingkan dengan data teknis yang sudah ada di lapangan. Dari kajian ulang perhitungan sistematis tersebut akan diketahui apakah data teknis lapangan sesuai dengan perhitungan sistematisnya dan berapakah selisih perbedaan nilai data teknis dengan perhitungan sistematis.

2.2. Dasar Teori

Landasan atau dasar teori sangat diperlukan untuk melakukan penelitian ini sebagai bahan acuan dasar. Landasan tersebut diperoleh dari berbagai penelitian terdahulu, jurnal ilmiah, buku, koran, majalah, ataupun yang berkaitan dengan penelitian.

2.2.1. Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik, turbin angin saat ini banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui.

Dalam konteks produksi listrik, turbin angin juga dikenal sebagai generator angin. Sebuah turbin angin terdiri dari struktur menara, rotor, baling-baling yang melekat pada rotor, dan generator. Rotor adalah komponen dari turbin angin yang mengumpulkan energi dari angin. Baling-baling dari turbin angin melekat pada pusat rotor. Baling-baling ini diputar oleh aliran angin dengan menggunakan desain aero dinamis. Tingkat kecepatan putaran baling-baling tergantung pada kecepatan angin dan bentuk baling-balingnya. Supaya menghasilkan listrik diperlukan generator, yang mengubah energi kinetik menjadi listrik. Untuk mengubah kecepatan putaran rendah baling-baling ke rotasi kecepatan tinggi, dalam turbin angin komersial terdapat gearbox yang ditempatkan di antara rotor dan generator yang diperlukan untuk memproduksi listrik.

Turbin angin memanfaatkan aliran angin pada ketinggian yang lebih tinggi karena kecepatannya yang lebih tinggi dan lebih konstan. Oleh karena itu turbin angin dipasang di atas struktur menara tinggi untuk dapat beroperasi pada ketinggian yang diperlukan. Energi listrik diperoleh ketika baling-baling pada

turbin angin diputar oleh aliran angin, yang membuat rotor berputar. Rotor mentransfer kekuatan ke generator (melalui gearbox) yang kemudian mentransmisikan daya yang telah dikonversi ke sebuah transformator dan akhirnya ke jaringan grid.

Pada prinsipnya, energi angin menggunakan persamaan berikut :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan

E : energi (Joule)

m : massa udara (kg/m³)

v : kecepatan angin (m/s)

Bergeraknya blok udara yang mempunyai penampang seluas A (m²) dengan kecepatan v (m/s), akan didapatkan jumlah massa yang melewati sesuatu tempat pada setiap waktunya dengan persamaan berikut :

$$m = A \times v \times \rho \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan

A : luas penampang blok udara (m²)

v : kecepatan angin (m/s)

ρ : massa jenis udara (kg/m³)

Penggabungan kedua persamaan 2.1 dan 2.2 mendapatkan nilai daya yang dihasilkan energi angin seperti persamaan berikut

$$P = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times v^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan

- P : daya (Watt)
 ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
 A : luas penampang (m^2)
 V : kecepatan angin (m/s)

Efisiensi turbin angin, secara teori daya maksimal yang dapat dipanen dari angin adalah :

$$P_a = V \times I \dots\dots\dots (2.4)$$

$$P_{th} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times (V)^3 \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan

- P_a : daya aktual (Watt)
 P_{th} : daya teoritis yang dihasilkan (Watt)
 ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
 A : diameter sapuan motor (m^2)
 V : kecepatan angin (m/s)
 I : Arus (Ampere)

Besarnya energi yang didapat (P_e) adalah sebagai berikut:

$$P_e = 0,593 \times P_{th} \dots\dots\dots (2.6)$$

Oleh karena itu, suatu sistem konversi turbin angin tidak pernah mampu memanen lebih dari 60% daya teoritisnya. Biasanya kurang dari 0,593 yang dikarenakan oleh banyak faktor kehilangan lain yang tidak diperhitungkan, seperti faktor gesekan, faktor aerodinami sudu dan rotasi (Elektro & Teknik, 2017). Dengan demikian dapat dihitung efisiensi dengan rumus berikut:

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan

η : efisiensi

P_a : daya aktual (Watt)

P_e : energi yang didapat (Watt)

Untuk menentukan perangkat proteksi , hal yang paling penting adalah menghitung I_{sc} (arus short circuit). Untuk persamaan rumusnya sebagai berikut :

$$I_{3\text{phasa}} = \frac{E_{\text{phasa}}}{Z_{\text{ekivalen}}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

$I_{3\text{phasa}}$: Besar arus hubung singkat 3 phasa dalam ampere

E_{phasa} : Besar tegangan phasa terhadap netral sistem dalam volt

Z_{ekivalen} : Impedansi dari seluruh rangkaian dalam ohm

Berikut persamaan untuk menentukan besar nilai impedansi :

$$Z = \frac{E^2}{S} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

Z : Besar impedansi dalam ohm

E : Tegangan dasar dalam Volt

S : daya sumber dalam VA

Atau dengan persamaan berikut untuk menentukan impedansi dalam saluran sistem :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

Z : Impedansi dalam ohm

R : Resistansi dalam ohm

X : Reaktansi dalam ohm

Reaktansi bisa berupa beban Induktif atau beban kapasitif

X_L : Reaktansi Induktif

X_C : Reaktansi Kapasitif

Untuk persamaannya sebagai berikut :

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots(2.11)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

π : 22/7 atau 3,14

f : frekuensi

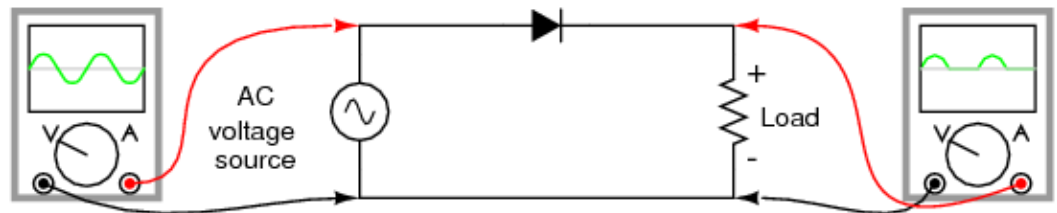
L : beban induktif

C : beban kapasitif

2.2.2. Kontrol Penyearah (Rectifier)

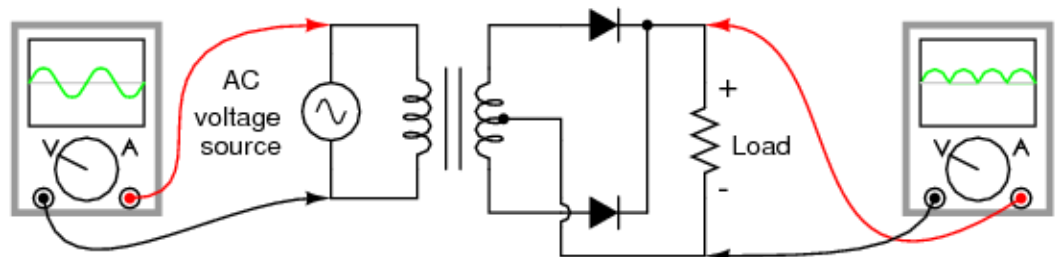
Rectifier atau dalam bahasa Indonesia disebut dengan Penyearah Gelombang adalah suatu bagian dari rangkaian catu daya atau power supply yang berfungsi sebagai pengubah sinyal AC (Alternating Current) menjadi sinyal DC (Direct Current). Rangkaian rectifier atau penyearah gelombang ini pada umumnya menggunakan dioda sebagai komponen utamanya. Hal ini dikarenakan dioda memiliki karakteristik yang hanya melewatkan arus listrik ke satu arah dan menghambat arus listrik dari arah sebaliknya. Jika sebuah dioda dialiri arus bolak-balik (AC), maka dioda tersebut hanya akan melewatkan setengah gelombang,

sedangkan setengahnya diblokir. Jenis penyearah yang paling sederhana adalah penyearah setengah gelombang, hal ini berarti hanya setengah gelombang yang diperoleh oleh beban seperti gambar berikut:



Gambar 2.1 Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang

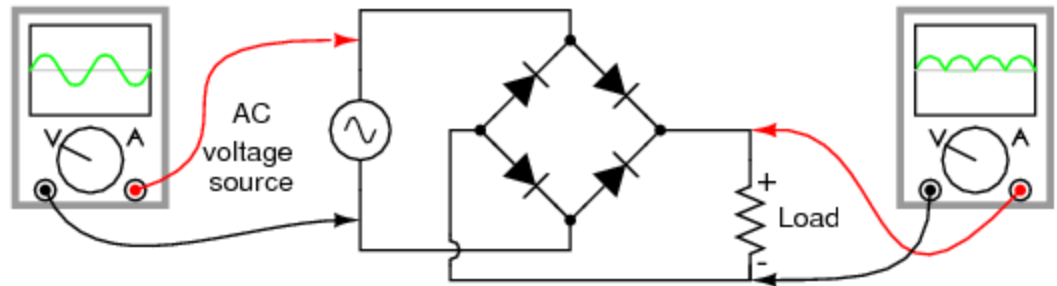
Jika ingin menyearahkan listrik AC untuk mendapatkan penggunaan penuh kedua setengah siklus dari gelombang sinus. Maka konfigurasi penyearah yang berbeda harus digunakan. Dan sirkuit seperti ini disebut penyearah gelombang penuh. Dan dalam penyearahan gelombang penuh ini digunakan transformator CT (*Centre Tapped*) dan 2 buah dioda. Seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.2 Penyearah Gelombang Penuh Dengan Trafo CT

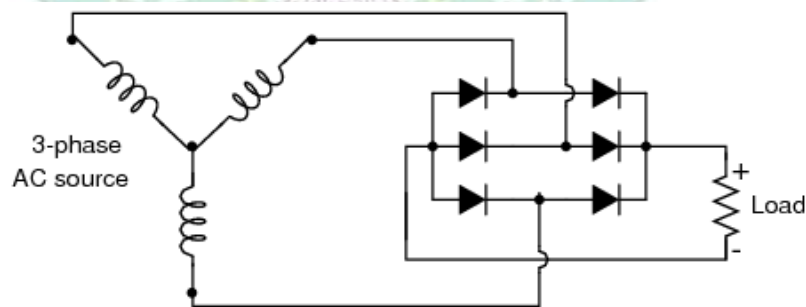
Desain yang lain dari penyearah gelombang penuh yang lebih populer atau lebih sering digunakan adalah dengan sistem jembatan

gelombang penuh. Dimana pada desain penyearah sistem jembatan ini dibangun dengan 4 buah dioda. Seperti gambar berikut:



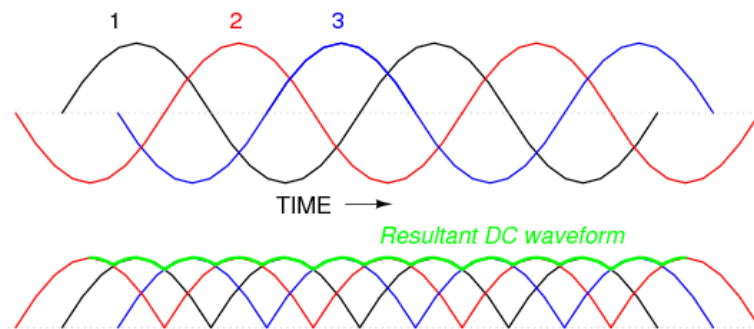
Gambar 2.3 Penyearah Gelombang Penuh Dengan Jembatan Wheatstone

Salah satu keuntungan dalam mengingat tata letak penyearah yang seperti diatas ini adalah hal tersebut bisa dikembangkan dengan lebih mudah ke dalam versi *polyphase* (fasa lebih dari satu), seperti versi rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa berikut ini:



Gambar 2.4 Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa (*polyphase*)

Dalam alam penyearah gelombang penuh versi *polyphase* ini, pulsa fasa bergeser saling tumpang tindih, sehingga menghasilkan output tegangan DC yang jauh lebih halus dibandingkan dengan penyearah gelombang penuh versi satu fasa. Perhatikan gambar dibawah ini yang menunjukkan penyearah gelombang penuh dari AC 3 fasa.



Gambar 2.5 Gelombang AC 3 Fasa Keluaran Penyearah Gelombang Penuh

Dalam setiap kasus penyearah, baik itu penyearah satu fasa (*single phase*) ataupun lebih (*polyphase*), jumlah tegangan AC yang bercampur dengan tegangan DC output penyearah disebut sebagai riak tegangan. Tegangan riak ini tidak diinginkan karena dalam kebanyakan kasus tujuan dari menyearahkan tegangan AC adalah untuk mendapatkan tegangan DC yang murni. Pada tingkat daya yang tidak terlalu besar, tegangan riak ini dapat dikurangi dengan penyaringan atau filter. Dan filter yang digunakan pada umumnya adalah filter pasif LC.

2.2.3. Charge Controller

Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan baterai sebagai penyimpanan, listrik AC 3 fasa yang dihasilkan oleh turbin angin diubah terlebih dahulu menjadi listrik DC menggunakan rectifier/kontrol penyearah yang nantinya digunakan untuk mengisi baterai sebelum dihubungkan ke inverter. Untuk mengisi baterai menggunakan sebuah alat yang di sebut *Charge Controller*, listrik DC dari kontrol penyearah dihubungkan terlebih dahulu dengan *Charge Controller* supaya tidak terjadi kesalahan seperti tegangan yang melampaui batas atau terjadinya arus balik ke kontrol penyearah. *Charge Controller* dalam sistem pembangkit

listrik tenaga angin sering disebutkan sebagai BCU (*Battery Control Unit*) atau BCR (*Battery Control Regulator*).

Charge Controller merupakan sebuah alat elektronik yang berfungsi sebagai regulator tegangan / arus yang dapat mengontrol dan menjaga baterai dari pengisian berlebih yang bertujuan untuk mengoptimalkan dan menjaga sistem agar masa pakai baterai dapat dimaksimalkan. Dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin, *Charge Controller* dapat bekerja dalam beberapa kondisi :

a. Mengendalikan tegangan turbin angin

Tanpa adanya kendali atau kontrol, turbin angin akan melakukan pengisian baterai melebihi tegangan daya yang dapat ditampung baterai sehingga dapat merusak sel baterai atau mengurangi masa pakai baterai bahkan bisa menimbulkan baterai meledak.

b. Mencegah arus balik ketika turbin angin tidak bekerja

Saat kecepatan angin menurun, turbin angin berputar pelan atau bahkan berhenti berputar sehingga output arus yang dikeluarkan turbin angin sangat kecil bahkan tidak ada. Kondisi ini menyebabkan baterai yang seharusnya disuplai arus berbalik menjadi menyuplai arus untuk turbin angin. Dalam kondisi tersebut, *Charge Controller* bekerja untuk menghentikan arus balik yang terjadi sehingga tidak menyebabkan kerusakan dalam sistem.

c. Mengawasi tegangan Baterai

Charge Controller dapat mendeteksi saat kondisi tegangan baterai terlalu rendah. Dalam kondisi tersebut *Charge Controller* akan bekerja untuk memutus beban dari baterai agar daya baterai tidak habis sepenuhnya sehingga terhindar dari kerusakan.

2.2.4. *Inverter*

Umumnya dalam kehidupan sehari-hari perangkat listrik seperti lampu, setrika, pompa air, dll memerlukan sumber tegangan listrik AC. Sedangkan listrik keluaran dari *Charge Controller* berupa listrik DC, untuk mengkonversi listrik DC menjadi AC memerlukan sebuah alat yaitu *inverter*.



Gambar 2.6 *Inverter 5 KVA PLTH Bayu Baru*

Inverter merupakan suatu rangkaian listrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output AC. Sumber tegangan input inverter dapat menggunakan baterai, sel bahan bakar, akumulator atau sumber tegangan DC yang lain.

Pada inverter ada tiga jenis gelombang yang dihasilkan, pemilihan dari ketiga jenis gelombang ini sangat penting dalam menentukan jenis inverter yang dibutuhkan (Teknik & Elektro, 2011).

1. Gelombang Kotak (Square Wave)

Beberapa tahun lalu, hanya inverter ini yang tersedia. Namun saat ini sudah jarang ditemukan. Hal ini disebabkan oleh banyaknya peralatan elektronik yang tidak dapat bekerja jika mendapat tegangan input dari inverter dengan bentuk gelombang kotak ini.

2. Gelombang Sinus Termodifikasi

Bentuk gelombang jenis ini merupakan pilihan masyarakat karena inverter dengan gelombang ini lebih ekonomis dan penggunaannya lebih fleksibel, antara lain peralatan listrik rumah tangga, komputer dan lain-lain. Namun, bentuk gelombang ini tidak cocok bila digunakan pada alat-alat listrik dengan presisi gelombang sangat tinggi, seperti laser jet dan alat-alat kedokteran.

3. Gelombang Sinus Murni

Inverter jenis ini memiliki bentuk gelombang keluaran paling baik. Bentuk gelombang sinus murni dari inverter ini setara bahkan lebih baik dari kualitas gelombang listrik rumahan yang berasal dari PLN.

Untuk menghitung kapasitas inverter dalam sebuah pembangkit listrik tenaga bayu/angin adalah seperti berikut:

$$\text{Kapasitas inverter minimum} = \Sigma P_{\text{beban}} \times \text{safety factor} \dots \dots (2.13)$$

Keterangan

ΣP_{beban} = total daya beban

2.2.5. Daya

Pada sistem tenaga listrik, daya adalah sejumlah energi listrik yang diperlukan untuk melaksanakan suatu usaha (Liliaana & Syahputra, 2014). Satuan dari daya listrik (P) dilambangkan dalam satuan internasional yaitu Watt. Satuan daya didapatkan dari hasil kali antara tegangan dan kuat arus.

$$P = V \times I \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan

P = daya (Watt)

V = tegangan (Volt)

I = arus (Ampere)

2.2.6. Menentukan Perangkat Proteksi

Untuk menghindari kerusakan yang ada pada pembangkit listrik tenaga bayu/angin baik yang disebabkan oleh panasnya kawat penghantar oleh beban yang melebihi kapasitas maupun arus hubung singkat perlu adanya sistem proteksi. Sistem proteksi merupakan susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip-prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20. Pemilihan kapasitas perangkat proteksi berdasarkan perhitungan sangat penting guna mencegah terjadinya kegagalan sistem.

2.2.6.1. Menentukan kapasitas MCB (*Miniatur Circuit Breaker*)

Alat pengaman otomatis yang dipergunakan untuk membatasi arus listrik. Alat pengaman ini dapat juga berguna sebagai saklar. Dalam penggunaannya, pengaman ini harus disesuaikan dengan besar listrik yang terpasang. Hal ini untuk menjaga agar listrik dapat berguna sesuai kebutuhan (Wijaya, I, 2007).

MCB merupakan rangkaian pengaman yang dilengkapi dengan komponen bimetal untuk pengamanan beban lebih. MCB juga dilengkapi *relay* elektromagnetik untuk perlindungan terhadap arus hubung singkat, MCB akan memutus rangkaian bila terjadi arus hubung singkat, beban

melebihi rating MCB dan pada kondisi tegangan yang normal ataupun tidak normal.

Sifat dari MCB adalah dapat memutuskan arus beban bila panas yang ditimbulkan melebihi panas yang diizinkan, memutuskan arus hubung singkat tanpa adanya perlambatan, dan setelah dilakukan perbaikan maka MCB dapat digunakan kembali. Oleh karena itu, MCB mempunyai kegunaan untuk membatasi penggunaan listrik, mematikan apabila terjadi hubung singkat, dan mengamankan instalasi listrik (Vinet & Zhedanov, 2011).

Agar MCB dapat berfungsi dengan optimal dan sesuai dengan yang diharapkan untuk proteksi arus lebih ataupun short circuit tentunya harus diketahui berapa ukuran MCB yang akan digunakan dalam satuan besaran arus (Ampere).

Untuk menentukan ukuran MCB, harus mengetahui berapa arus maksimal yang akan digunakan dan dilalui oleh MCB tersebut, sehingga saat terjadi kerusakan atau arus lebih, maka MCB terlebih dahulu bekerja memutuskan sumber listrik, sehingga berbagai macam peralatan listrik lainnya bisa terlindungi dari kerusakan.

Oleh karena itu, ukuran MCB yang digunakan harus lebih besar dari arus listrik yang dilaluinya, sehingga jika rangkaian beroperasi dalam keadaan normal maka MCB tidak akan bekerja memutuskan rangkaian. Jika ukuran MCB yang digunakan terlalu besar dibanding dengan arus listrik yang dilalui tentunya akan menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik lainnya karena saat terjadi arus lebih MCB belum bekerja hingga batas ukuran MCB yang digunakan tercapai. Apabila ukuran MCB yang digunakan terlalu kecil atau lebih kecil dari besaran arus listrik normal yang digunakan tentunya saat rangkaian dan peralatan

listrik beroperasi secara normal, MCB sudah bekerja memutuskan rangkaian listrik sehingga pengoperasian rangkaian listrik tidak akan beroperasi dengan baik dan tidak sesuai keinginan. Sehingga, untuk menentukan ukuran MCB yang benar adalah:

$$\text{Minimum MCB size} = I_{sc} \times 1,56 \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan

I_{sc} = arus short circuit

2.2.6.2. Menentukan kapasitas Fuse dalam pembangkit listrik tenaga bayu/angin

Fuse merupakan sebuah perangkat proteksi kelistrikan yang fungsinya sebagai pengaman hubung singkat dan arus lebih.



Gambar 2.7 Fuse link

Di dalam *fuse* terdapat kawat lebur yang fungsinya sebagai penghantar arus dan juga sebagai pengaman dari arus hubung singkat. Prinsip kerja dari *fuse* adalah apabila terjadi gangguan hubung singkat atau arus lebih, kawat lebur yang berada didalam *fuse* akan mengalami kenaikan suhu sehingga akan melebur atau putus sehingga gangguan yang terjadi tidak merusak perngkat lain dalam sistem.

Pemilihan kapasitas *fuse* untuk proteksi pembangkit listrik harus sesuai standar IEC 60.269-6. Dalam standar IEC 60.269-6 pemilihan *fuse* minimum untuk perlindungan dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Minimum Fuse current rating} = I_n \times 1.56 \dots \dots \dots (2.16)$$

Keterangan

I_n = arus nominal

2.2.6.3. Menentukan Kapasitas Kabel untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin

Kabel merupakan sebuah media untuk menghantarkan arus listrik yang terdiri dari konduktor dan isolator. Pada sistem pembangkit listrik DC konfigurasi kabel menggunakan konfigurasi kabel 2 kawat.



Gambar 2.8 Kabel NYAF untuk instalasi PLTB

Pemilihan kabel dalam pembangkit listrik tenaga bayu/angin harus akurat agar mengurangi drop tegangan dalam sistem. Untuk menghitung luas penampang kabel yang dibutuhkan dalam sistem terdapat dalam persamaan berikut:

$$A = \frac{2}{y \cdot Vd} (I \cdot L) \dots\dots\dots(2.17)$$

keterangan

- A = Luas penampang kabel
- y = Daya hantar jenis
- L = Panjang kabel
- I = Arus
- Vd = drop tegangan yang diizinkan

