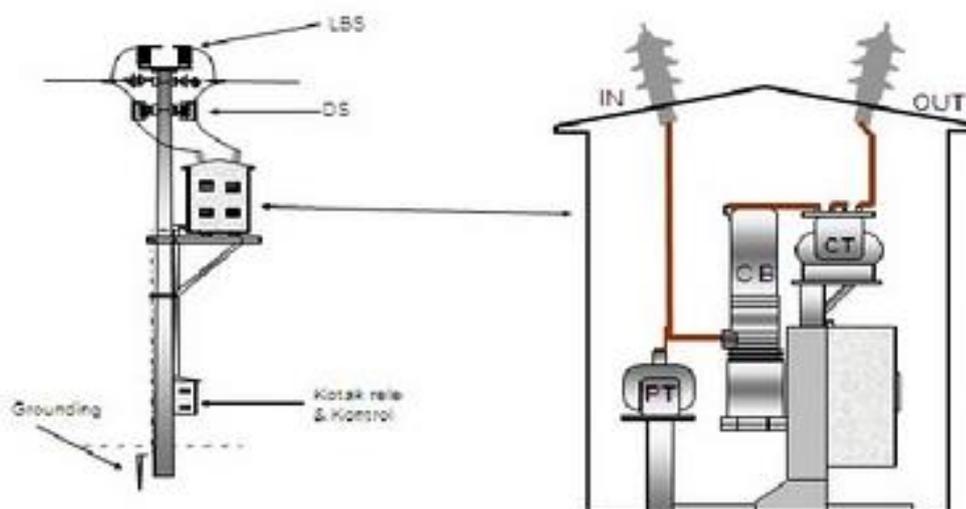


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

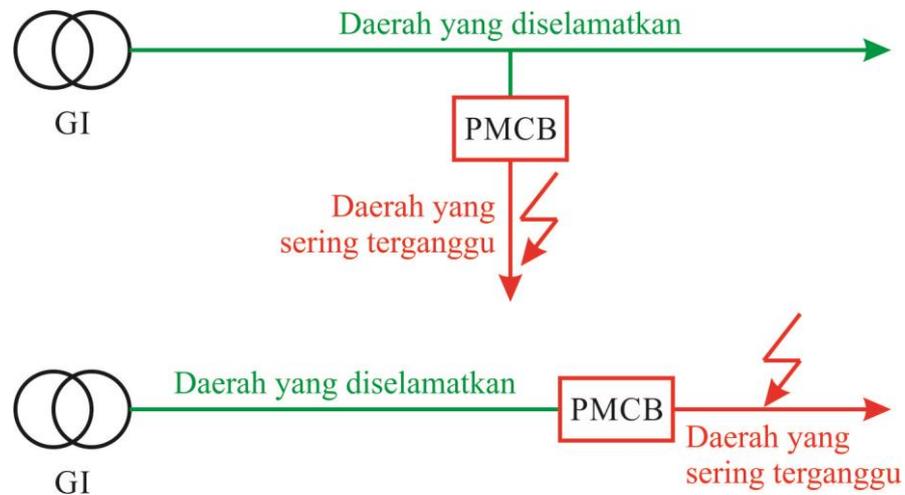
2.1 Pengertian PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*)¹

PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*) adalah sistem proteksi yang terpasang pada tiang jaringan listrik 20 kV untuk semua jenis sistem pentanahan yg efektif, flesibel, murah, sekaligus untuk Alat Pembatas dan Pengukur (APP) pelanggan PT. PLN (Persero), untuk tegangan menengah. Dengan menggunakan PMCB, lingkungnya lebih kecil dan akan melokalisir pemutusan aliran listrik di suatu daerah bila terjadi gangguan, dibandingkan bila pemutusan aliran dari gardu induk. Pengukuran penggunaan listrik untuk pelanggan juga akan lebih akurat dan dapat mendeteksi kebocoran listrik bila terjadi. Adapun gambar konstruksi pemasangan PMCB dapat di lihat pada Gambar 2.1. Sedangkan Gambar 2.2 dan 2.3 adalah tempat pemasangan PMCB pada jaringan listrik 20kV.



Gambar 2.1 Konstruksi PMCB

¹ Sari, Marshella. 2012. *Sistem Pengaman Listrik*. (<http://www.slideshare.net/marshellasari/sistem-pengaman-listrik>)



Gambar 2.2 Penempatan PMCB pada jaringan listrik 20kV



Gambar 2.3 Contoh pemasangan PMCB pada tiang penyulang

2.2 Fungsi PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*)²

PMCB sebagai pengaman pada jaringan listrik tegangan menengah memiliki beberapa fungsi, yaitu:

1. Melokalisir gangguan listrik hanya pada daerah yang terganggu saja secara selektif.

² Sari, Marshella. 2012. *Sistem Pengaman Listrik*. (<http://www.slideshare.net/marshellasari/sistem-pengaman-listrik>)

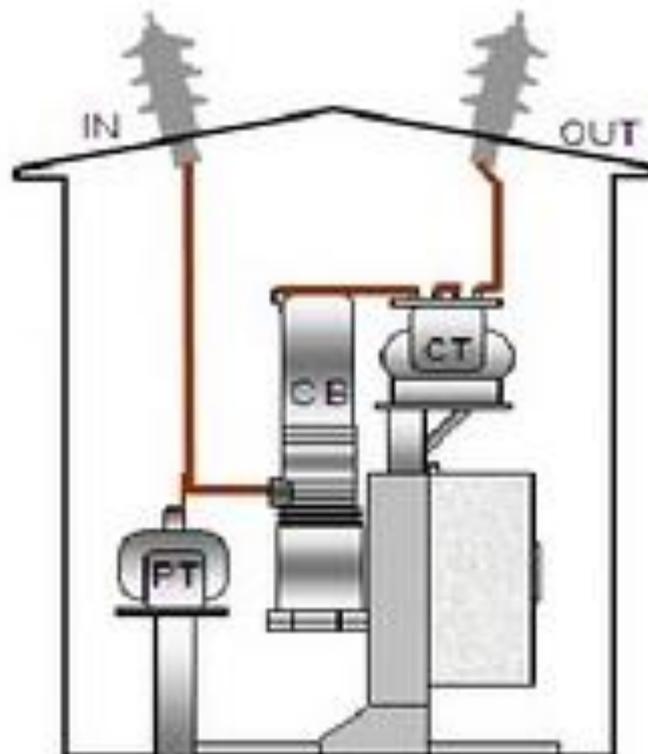


2. Sebagai recloser untuk gangguan temporer (sementara).
3. Sebagai alat ukur presisi kWh EXIM (*Export – Import*) perbatasan 2 area kerja.
4. Sebagai alat ukur presisi APP (Alat Pengukur dan Pembatas) Pelanggan.
5. Sebagai sarana *Manual Load Shedding* dengan adanya fasilitas *Master Remote Control*.

2.3 Spesifikasi PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*)³

Seperti terlihat pada Gambar 2.1, PMCB terdiri dari 1 box besar sebagai tempat sistem pemutus tenaga dan box kecil yang merupakan kotak rele dan kontrol.

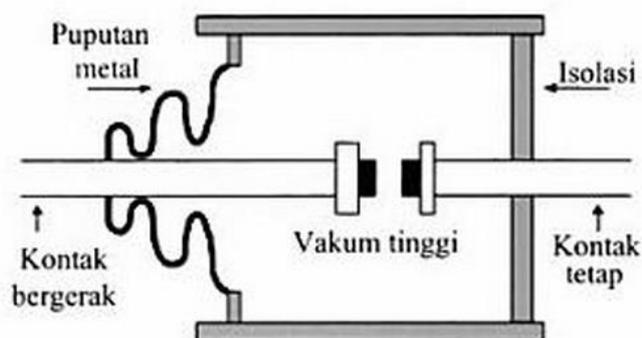
2.3.1 Box besar



Gambar 2.4 Box Besar

³ Baktianto, Riza. 2011. *CB Pengaman di Tiang*.
(<http://rizabaktianto.blogspot.com/2011/11/circuit-breaker-konstruksi-di-tiang.html>)

1. VCB (*Vacuum Circuit Breaker*)⁴



Gambar 2.5 VCB (*Vacuum Circuit Breaker*)

Pada VCB (*Vacuum Circuit Breaker*) atau yang disebut juga Pemutus Daya Vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Untuk mencegah udara masuk ke dalam bilik, maka bilik harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam.

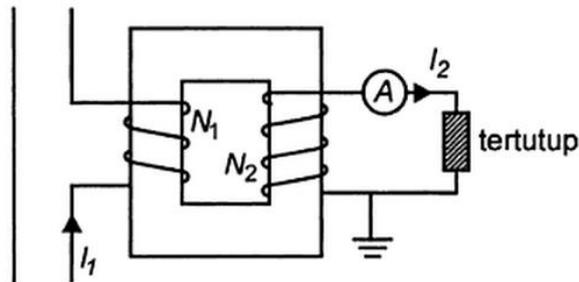
Jika kontak dibuka, maka pada katoda kontak terjadi emisi termis dan medan tegangan yang tinggi yang memproduksi elektron-elektron bebas. Elektron hasil emisi ini bergerak menuju anoda. Dalam perjalanannya menuju anoda, elektron-elektron bebas ini tidak bertemu dengan molekul udara sehingga tidak terjadi ionisasi tumbukan. Akibatnya, tidak ada penambahan elektron bebas yang mengawali pembentukan busur api. Dengan kata lain, busur api dapat dipadamkan.

2. CT (*Current Transformers*) indoor⁵

CT (*Current Transformers*) atau Transformator Arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian. Dengan menggunakan transformator arus maka arus beban yang besar dapat diukur dengan hanya dengan menggunakan pengukur arus (ammeter) yang kecil.

⁴ Tobing, Bonggas L. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama; hal. 35.

⁵ Suhal & Zhanggischian. 2004. *Prinsip Dasar Elektronik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama; hal. 650.

Gambar 2.6 CT (*Current Transformers*)

Dengan mengetahui perbandingan transformasi N_1/N_2 dan pembacaan ammeter (I_2), arus beban I_1 dapat dihitung. Bila transformator dianggap ideal maka arus beban:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \times I_2 \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk menjaga agar fluks (f) tidak berubah, maka perlu diperhatikan agar rangkaian sekunder selalu tertutup. Dalam keadaan rangkaian sekunder terbuka, ggm $N_2 I_2$ akan sama dengan nol (karena $I_2 = 0$) sedangkan ggm $N_1 I_1$ tetap ada, sehingga fluks (f) normal akan terganggu.

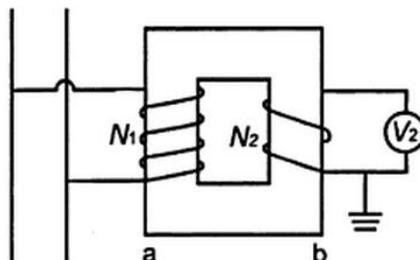
Trafo arus dalam ruangan (*indoor*) biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil daripada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



Gambar 2.7 CT Indoor



3. PT (*Potential Transformers*) indoor ⁶



Gambar 2.8 PT (*Potential Transformers*)

PT (*Potential Transformers*) atau Transformator Tegangan digunakan untuk mengukur tegangan. Dengan mengetahui N_1 dan N_2 , membaca tegangan V_2 , serta menganggap transformator ideal maka tegangan V_1 adalah:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} \times V_2 \dots\dots\dots (2.2)$$

Pentanahan rangkaian sekunder diperlukan untuk mencegah adanya beda potensial yang besar antara kumparan primer dan sekunder (antara titik a dan b) pada saat isolasi kumparan primer rusak.

Trafo tegangan dalam ruangan (*indoor*) biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil daripada trafo tegangan pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



Gambar 2.9 PT Indoor

⁶ Suhail & Zhanggischian. 2004. *Prinsip Dasar Elektronik*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama; hal. 650



4. *Bushing* TM 20kV ⁷

Bushing adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan rangkaian dalam box dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Bahan *bushing* adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang.



Gambar 2.10 *Bushing* TM 20kV

5. Busbar tembaga

Fungsi busbar (rel) pada panel adalah titik pertemuan atau hubungan peralatan listrik untuk menerima dan menyalurkan tenaga / daya listrik.

6. Box besar

Box PMCB ini terbuat dari plate besi PMCB ukuran 1000 x 950 x 1300 mm, menggunakan plate besi tebal 2,5 mm.

⁷ Admin. *Komponen Listrik*. (<http://listrikonlen.blogspot.com/2012/04/fungsi-komponen-pada-transformator-tiga.html>)



2.3.2 Box kecil ⁸



Gambar 2.11 Box Kecil

Pada box kecil berfungsi untuk mengontrol VCB yang ada di box besar. Dalam box kecil terdapat rele yang berfungsi sebagai pemonitor dan pemberi perintah ke VCB untuk memutuskan jaringan. Selain itu juga terdapat battery 24 VDC yang berfungsi sebagai tenaga cadangan untuk menggerakkan motor VCB. Selain battery, juga terdapat battery charger yang berfungsi untuk mencharg battery tersebut.

2.4 Cara Kerja PMCB (*Pole Mounted Circuit Breaker*)

Secara umum prinsip kerja dari PMCB sama dengan cara kerja CB/PMT. Yang membedakan kedua peralatan proteksi ini yaitu letak masing-masing protektor, yang mana CB ditempatkan di Gardu Induk (GI) sedangkan PMCB di posisikan di tengah jaringan, tengah beban, di daerah yang sering gangguan, ataupun di daerah yang diprioritaskan.

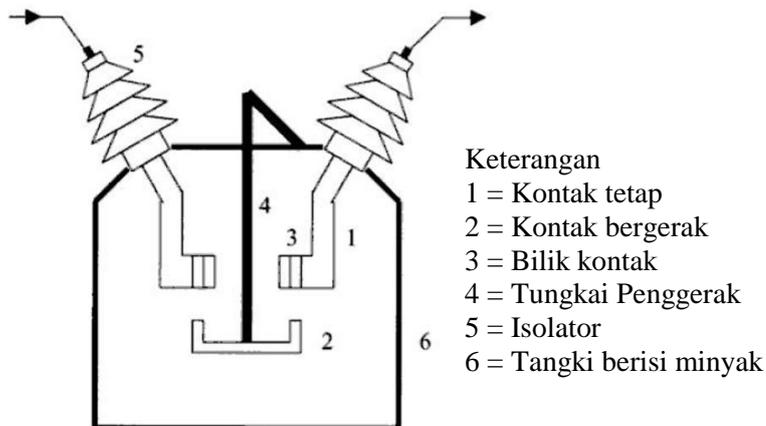
2.4.1 Hubungan rele dan pemutus daya ⁹

Konstruksi suatu pemutus daya ditunjukkan pada Gambar 2.12. Bagian utama pemutus daya adalah kontak tetap dan kontak bergerak. Kontak bergerak dapat digerakkan secara manual atau dengan bantuan motor listrik atau sistem pneumatik. Jika kontak bergerak ditarik ke atas, maka pemutus daya dalam kondisi

⁸ Baktianto, Riza. 2011. *CB Pengaman di Tiang*. (<http://rizabaktianto.blogspot.com/2011/11/circuit-breaker-konstruksi-di-tiang.html>)

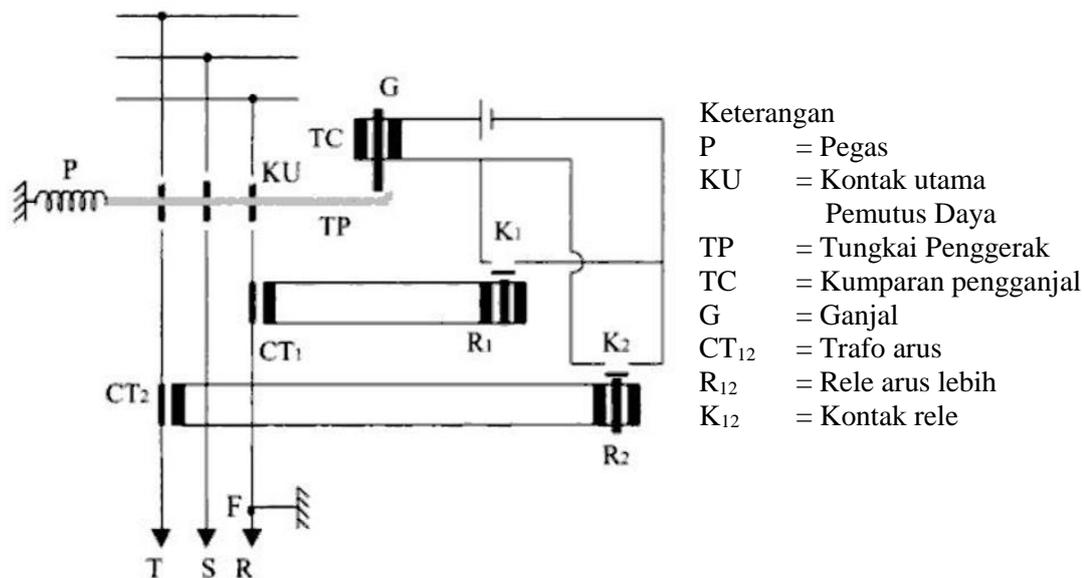
⁹ Tobing, Bonggas L. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama; hal. 15.

tertutup. Jika kontak bergerak didorong ke bawah, maka pemutus daya dalam kondisi terbuka.



Gambar 2.12 Konstruksi Pemutus Daya

Hubungan kerja pemutus daya dan rele proteksi ditunjukkan pada Gambar 2.13. misalkan hubungan singkat terjadi pada fasa R. Akibatnya arus di fasa R melonjak relatif besar. Arus yang besar ini melalui kumparan primer CT₁, akibatnya arus yang mengalir di kumparan sekunder CT₁ dan rele R₁ juga semakin besar. Jika arus tersebut melebihi setelan arus rele maka rele bekerja menutup kontak K₁, akibatnya arus mengalir pada kumparan penggantal TC sehingga ganjal G tertarik ke atas. Akibatnya tungkai penggerak TP tertarik ke kiri dan kontak utama KU terbuka.

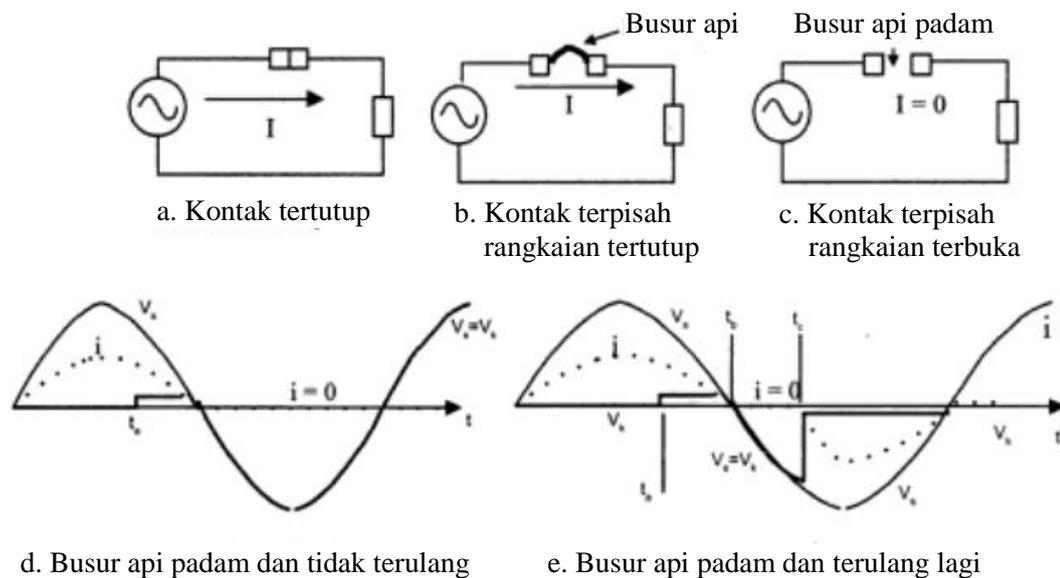


Gambar 2.13 Hubungan Rele Proteksi dan Pemutus Daya



2.4.2 Proses pemutusan rangkaian suatu sistem

Proses pemutusan hubungan suatu rangkaian dapat dijelaskan dengan Gambar 2.14. Gambar 2.14.a menunjukkan rangkaian saat dialiri arus bolak-balik.



Gambar 2.14 Proses Pemutusan Hubungan Rangkaian

Jika kontak tertutup sempurna, maka tahanan antar kontak sangat kecil sehingga tegangan antar kontak dapat diabaikan. Misalnya kontak pemutus daya dibuka pada saat $t = t_a$ (lihat Gambar 2.14.d). Keadaan rangkaian menjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.b. Sesaat setelah pembukaan kontak akan timbul busur api di antara kontak, sehingga arus tetap mengalir pada rangkaian. Arus ini menimbulkan jatuh tegangan pada kontak, yaitu sebesar perkalian arus dengan tahanan busur api. Jatuh tegangan ini sangat kecil dibandingkan dengan puncak tegangan sumber dan berlangsung dalam selang waktu $t_a - t_b$. Selanjutnya pada saat $t = t_b$ (Gambar 2.14.d) arus akan menjadi nol dan pada saat bersamaan tegangan antar kontak menjadi sama dengan tegangan sumber, dan berangsur naik menuju harga maksimal. Adanya beda tegangan di antara kontak dapat mengulangi terjadinya busur api. Misalkan pada saat $t = t_c$ (Gambar 2.14.e) timbul lagi busur api, maka arus kembali mengalir pada rangkaian meskipun sebenarnya kontak pemutus daya sudah terpisah. Tegangan antarkontak yang menimbulkan pengulangan busur api adalah tegangan sumber pada saat $t = t_c$ dan disebut tegangan terpaan balik (*restrike voltage*). Hubungan rangkaian benar-benar terputus setelah



busur api padam dan tidak terulang lagi. Dalam hal ini tegangan dan arus sesaat ditunjukkan pada Gambar 2.14.d dan rangkaianannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.c.

2.5 Rele Arus Lebih¹⁰

Rele arus lebih adalah suatu rele yang bekerjanya didasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele dapat dipakai sebagai pengaman arus lebih. Berikut ini adalah karakteristik waktu kerja rele arus lebih:

1. Rele arus lebih seketika (*moment*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saat rele arusnya *pick up* sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20 – 100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*) dan hanya dalam beberapa hal berdiri sendiri secara khusus.

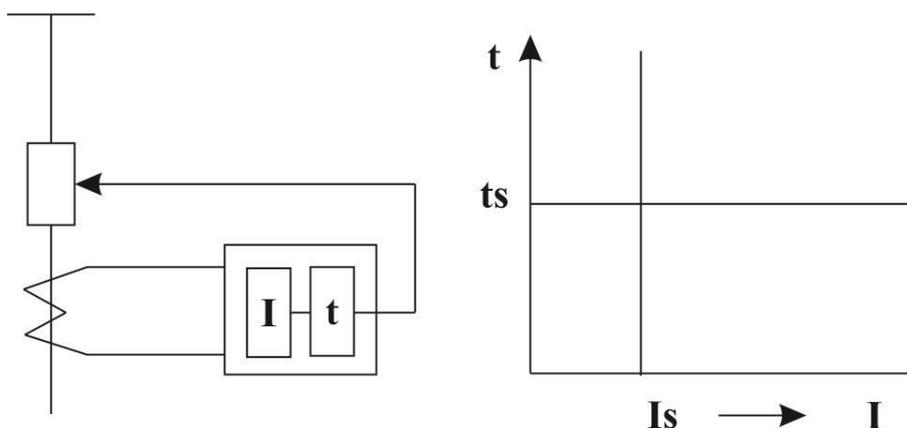
2. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus *pick up* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkannya.

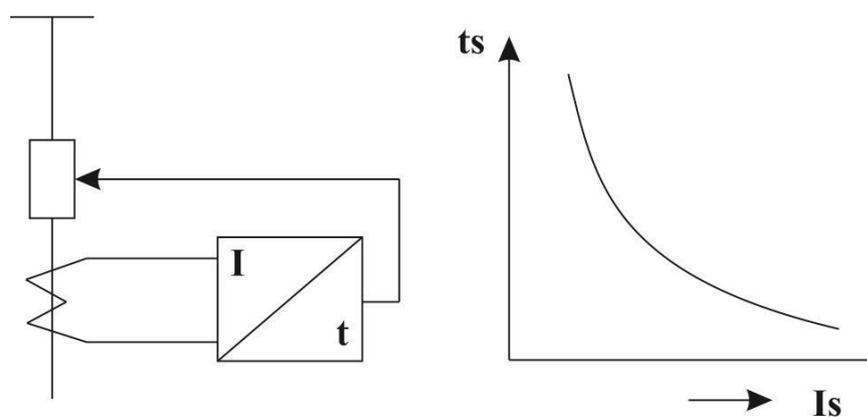
3. Rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik (*inverse time*)

Rele dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus *pick up* sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan.

¹⁰ Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Sriwijaya; hal. 53.



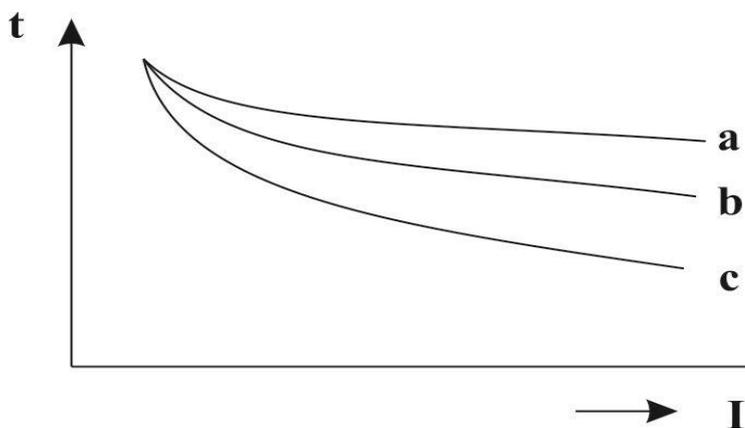
Gambar 2.15 Karakteristik Rele Arus Waktu Tertentu (*Definite Time*)



Gambar 2.16 Karakteristik Rele Arus Waktu Terbalik (*Inverse Time*)

Bentuk perbandingan terbalik dari waktu arus ini sangat bermacam-macam tetapi dapat digolongkan menjadi :

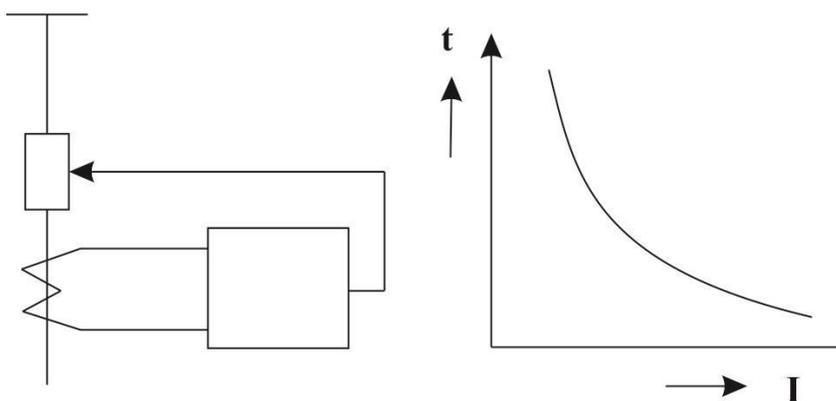
- a) Berbanding terbalik (*inverse*)
- b) Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- c) Sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*)



Gambar 2.17 Perbandingan Grafik Rele Arus Waktu Terbalik

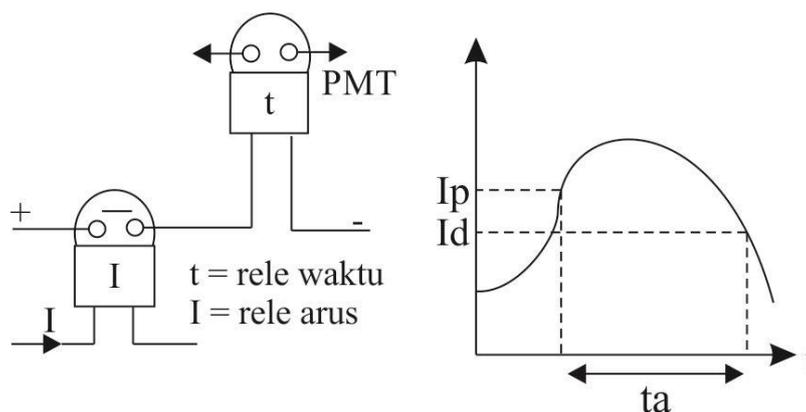
4. Rele arus lebih *inverse definite minimum time*¹¹

Rele arus lebih dengan karakteristik *inverse definite minimum time* (IDMT) ialah jika jangka waktu rele arus mulai *pick up* sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah rele *pick up* dan kemudian mempunyai sifat waktu tertentu untuk nilai arus yang lebih besar.



Gambar 2.18 Karakteristik Rele IDMT

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus tertentu, benbanding terbalik dengan IDMT dapat dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik seketika.



Gambar 2.19 Arus *Pick up* (kerja) dan arus kembali (*drop off*)

¹¹ Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Palembang: Universitas Sriwijaya; hal. 56.



- I_p = Nilai arus dimana rele arus akan bekerja dan menutup kontak a sehingga rele waktu bekerja, ini sering disebut arus kerja atau arus *pick up* (I_p).
- I_d = Nilai arus dimana rele arus berhenti bekerja dan kontak a membuka kembali, sehingga rele waktu berhenti bekerja, I_d sering disebut arus kembali atau arus drop off.

Bila $t_a < t$ setting maka arus lebih dinyatakan tidak bekerja, sedang bila $t_a > t$ rele arus lebih dinyatakan bekerja. Perbandingan arus kembali dengan arus *pick up* sering dinyatakan dengan kd atau

$$Kd = id/ip \dots \dots \dots (2.3)$$

kd untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu mempunyai nilai 0,7 – 0,9. Untuk rele arus lebih dengan karakteristik waktu terbalik mempunyai nilai $\approx 1,0$.

2.6 Perhitungan impedansi jaringan distribusi ¹²

Perhitungan impedansi jaringan distribusi 20kV adalah impedansi (ohm/km) yang tergantung luas penampang, nilai impedansi dalam ohm tergantung dari panjang kawat. Atau dapat ditulis dengan persamaan:

$$Z = \text{panjang penyulang} \times \text{Impedansi urutan positif} \dots \dots \dots (2.4)$$

2.7 Perhitungan arus gangguan hubung singkat ¹³

Gangguan hubung singkat mungkin terjadi pada setiap titik pada jaringan distribusi. Dalam hal ini kita perlu menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat, sehingga bila gangguan hubung singkat itu benar-benar terjadi di dalam sistem, dapat diketahui terlebih dahulu besar arus gangguannya dan arus gangguan yang dihitung dapat juga dipergunakan untuk mensetting peralatan proteksi.

¹² Pribadi K & Wahyudi SN. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. PLN Corporate University; hal. 19.

¹³ Pribadi K & Wahyudi SN. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. PLN Corporate University; hal. 15.



Gangguan hubung singkat pada sistem 3 fasa, adalah:

- Gangguan 3 fasa.
- Gangguan 2 fasa.
- Gangguan 2 fasa atau 1 fasa ke tanah.

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, 2 fasa ke tanah atau 1 fasa ke tanah, arus gangguannya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan umum (Hukum Ohm), yaitu:

$$I = \frac{E}{Z} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

I = Arus yang mengalir (A)

E = Tegangan Sumber (Volt)

Z = Impedansi jaringan (Ω)

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan nilai impedansi tiap komponen jaringan, serta bentuk konfigurasinya di dalam sistem, maka besarnya arus gangguan hubung singkat dapat dihitung.

Lebih lanjut besarnya arus yang mengalir pada tiap komponen jaringan juga dapat dihitung dengan bantuan persamaan tersebut. Yang membedakan antara gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, 2 fasa ke tanah atau 1 fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan hubung singkat itu sendiri, seperti persamaan berikut ini:

$$Z_{3\emptyset} = Z_1 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$Z_{2\emptyset} = Z_1 + Z_2 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$Z_{2\emptyset \text{ ke tanah}} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$Z_{1\emptyset \text{ ke tanah}} = Z_1 + Z_2 + Z_0 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

Z₁ = Impedansi urutan positif (Ω)

Z₂ = Impedansi urutan negative (Ω)

Z₃ = Impedansi urutan nol (Ω)



2.7 Perhitungan setelan rele arus lebih ¹⁴

Pada tahap berikutnya, hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk menentukan nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan TMS (Time Multiple Setting), dari rele arus lebih dengan karakteristik jenis Inverse. Di samping itu setelan rele diperoleh, nilai-nilai arus gangguan yang diasumsikan, dipakai untuk memeriksa rele arus lebih itu, apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus dirubah ke nilai lain yang memberikan kerja rele yang lebih selektif atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum.

Untuk menghitung arus nominal dapat digunakan dengan menggunakan persamaan:

$$I_N = \frac{S}{V\sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

I_N = Arus nominal (A)

S = Kapasitas trafo (kVA)

V = Tegangan jaringan (V)

Sesuai British standard untuk:

1. Rele Inverse biasa diset sebesar 1,05 s/d $1,3 \times I_N$ (2.11)

2. Rele Definite biasa diset sebesar 1,2 s/d $1,3 \times I_N$ (2.12)

2.8 Perhitungan setelan *Time Multiple Setting* (TMS)

Setelan Time Multiple Setting (TMS) dan setelan waktu rele pada jaringan distribusi mempergunakan standar inverse, yang dihitung mempergunakan rumus kurva waktu V_s arus, dalam hal ini juga diambil persamaan kurva arus waktu waktu dari standard British, sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_f}{I_s} \right)^\alpha - 1 \right)}{\beta} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dari

¹⁴ Pribadi K & Wahyudi SN. *Perhitungan Setting dan Koordinasi Proteksi Sistem Distribusi*. PLN Corporate University; hal. 20.



$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^\alpha - 1} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana:

TMS = Penyetelan waktu

t = Waktu penyetelan (dt)

I_f = Arus gangguan (A)

I_s = Arus penyetelan (A)

α, β = Konstanta

Tabel 2.1 Faktor α dan β tergantung pada kurva arus V_s waktu

Nama Kurva	α	β
Standar inverse	0,02	0,14
Very inverse	1	13,2
Extremely inverse	2	80
Long inverse	1	120

2.9 Perhitungan Kajian Kelayakan Finansial (KKF) ¹⁵

Dalam perhitungan Kajian Kelayakan Finansial (KKF) hal yang harus dihitung adalah besar energi yang akan diselamatkan, namun Sebelum itu, hitung terlebih dahulu hitung besar daya terlihat yang akan diselamatkan. Dimana daya listrik didefinisikan sebagai besarnya energi listrik yang diperlukan tiap satuan waktu. Sedangkan energi listrik didefinisikan sebagai kemampuan suatu sumber tegangan untuk melakukan usaha pemindahan muatan listrik melalui beda potensial sehingga arus listrik dapat mengalir. Dimana besar daya dan energi tersebut dapat dicari adalah dengan menggunakan persamaan:

$$P = S \times \cos \theta \dots\dots\dots(2.15)$$

$$W = P \times t \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana

P = Daya aktif (W)

¹⁵ Hermawan, Sandy. 2014. *Mini Book Master Fisika (Langsung Pinter)*. Jakarta: Wahyu Media; hal. 262.



S = Beban terselamatkan (VA)

W = Energi listrik (J)

t = waktu (h)

Dengan mengetahui jumlah energi yang terselamatkan, maka jumlah finansial yang akan diselamatkan oleh PT. PLN (Persero) sebagai acuan berapa lama modal yang telah dipakai untuk pengadaan PMCB dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\text{Jumlah Finansial} = \text{Energi Listrik} \times \text{Tarif Tenaga Listrik} \dots\dots\dots (2.17)$$