

Jurnal Ilmiah

ENERGI & KELISTRIKAN



SEKOLAH TINGGI TEKNIK - PLN

PRAKIRAAN KEBUTUHAN ENERGI LISTRIK WILAYAH JAWA - BALI TAHUN 2017 - 2036 DENGAN GABUNGAN METODE ANALITIS, EKONOMETRI, DAN KECENDERUNGAN

Soetjipto Soewono; John Pantouw; Septianissa Azzahra

IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY UNTUK SISTEM OTOMATISASI PENGATURAN PENGISIAN BATERE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Tri Joko Pramono; Dhami Johar Damiri; Supriadi Legino

STUDI PENYIMPANAN ENERGI PADA BATERAI PLTS

Retno Aita Diantari; Erlina; Christine Widyastuti

POTENSI PEMANFAATAN BIOMASSA SEKAM PADI UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK MELALUI TEKNOLOGI GASIFIKASI

Isworo Pujotomo

KONTROL PENERANGAN TENAGA SURYA SEBAGAI IMPLEMENTASI DARI LISTRIK KERAKYATAN

Muchamad Nur Qosim; Isworo Pujotomo; Heri Suyanto

ANALISIS PENGGUNAAN LISTRIK ARUS SEARAH UNTUK MENINGKATKAN LAJU PRODUKSI MINYAK BUMI JENIS MINYAK BERAT

M. Hafidz; Martin Choirul Fatah; Sandy Suryakusuma

STUDI KELAYAKAN PEMBANGUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP 2X50 MW DENGAN MENGGUNAKAN BOILER CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION DI KENDARI, SULSELBAR

Harun Al Rasyid; Haqimul Batih; Raden Edi Sewandono

STUDI METODE PENGANTIAN RELAI MEKANIS MENJADI ELEKTRIS PANEL TEGANGAN MENENGAH PLTU UNIT 4 MUARA KARANG

Zainal Arifin; Santoso Januwarsono; Ryan Farieztya

KAJIAN PEMASANGAN LIGHTNING ARRESTER PADA SISI HV TRANSFORMATOR DAYA UNIT SATU GARDU INDUK TELUK BETUNG

Ibnu Hajar; Eko Rahman

ISSN 1979-0783



SEKOLAH TINGGI TEKNIK - PLN (STT-PLN)

ENERGI & KELISTRIKAN

VOL. 9

NO. 2

HAL. 101 - 179

JUNI - DESEMBER 2017

ISSN 1979-0783

KAJIAN PEMASANGAN *LIGHTNING ARRESTER* PADA SISI HV TRANSFORMATOR DAYA UNIT SATU GARDU INDUK TELUK BETUNG

Ibnu Hajar¹, Eko Rahman²

¹ibnu.hjr@gmail.com

²ekorahman1808@gmail.com

Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknik PLN Jakarta

Abstract : *Generally, The power centers are connected to the air transmission line, and the airborne transmission channel is susceptible to disturbances that are affected from outside the system, one of which is a lightning strike. Lightning strikes are harmful to the components present in the central power supply. And therefore, the protection from the lightning strikes is required, so that the components in the power center is not damaged when exposed to lightning surges. In this research we discussed the power transformer protection (60MVA) on the Teluk Betung substation so that the power transformer is safe from the over voltage caused by the lightning surge. The specification of the arresters mounted on the HV side of the power transformer unit one of Teluk Betung substation with nominal voltage of 144 kV has been in accordance with the system requirements. The maximum distance between the arrester and the allowable power transformer is 28.5 meters. Distance in the field is 3 meters, the voltage that arrives at the power transformer is 480 kV and still below the Basic insulation level of the transformer, so that the protection of the power transformer against the lightning surge is very good.*

Keywords: *Lightning Surge, Lightning Arrester, Teluk Betung Substation.*

Abstrak : *Umumnya Pusat-pusat listrik terhubung dengan saluran transmisi udara, dan saluran transmisi udara rentan mengalami gangguan yang dipengaruhi dari luar sistem, salah satunya adalah sambaran petir. Sambaran petir berbahaya bagi komponen-komponen yang terdapat pada pusat listrik. Oleh karena itu, diperlukan proteksi dari sambaran petir tersebut, agar komponen pada pusat listrik tidak mengalami kerusakan pada saat terkena surja petir. Pada penelitian ini dibahas proteksi transformator daya (60MVA) pada gardu induk teluk betung agar transformator daya tersebut aman dari tegangan lebih yang disebabkan oleh surja petir. Spesifikasi arrester yang terpasang pada sisi HV transformator daya unit satu gardu induk Teluk Betung dengan tegangan nominal 144 kV, telah sesuai dengan kebutuhan sistem. Jarak maksimum antara arrester dan transformator daya yang diperbolehkan adalah 28,5 meter. Jarak dilapangan adalah 3 meter, tegangan yang tiba pada transformator daya adalah 480 kV dan masih dibawah nilai tingkat isolasi dasar trafo, sehingga perlindungan transformator daya terhadap surja petir sudah sangat baik.*

Kata kunci : *Surja Petir, Lightning Arrester, Gardu Induk Teluk Betung.*

1. PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan komponen yang sangat penting yang terdapat pada gardu induk, sehingga pentingnya proteksi untuk transformator daya dari sambaran petir.

Spesifikasi *arrester* sangat penting untuk diperhatikan agar sesuai dengan

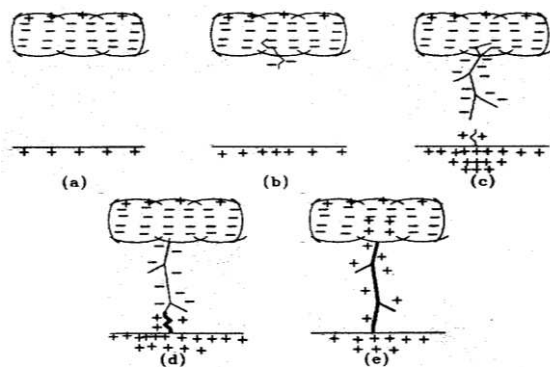
kebutuhan dari sistem tersebut sehingga *arrester* berfungsi sesuai dengan tugasnya. Penempatan *arrester* terhadap objek yang diproteksi (Transformator Daya) berpengaruh terhadap kualitas perlindungannya, ada jarak maksimum *arrester* terhadap transformator agar proteksi tersebut efektif. Jarak *arrester* di lapangan mempengaruhi tegangan yang

tiba pada transformator daya. Tingkat kepadatan petir di wilayah Bandar Lampung cukup tinggi sehingga diperlukan perhatian yang serius untuk penanggulangan dari gangguan surja petir.

2. LANDASAN TEORI

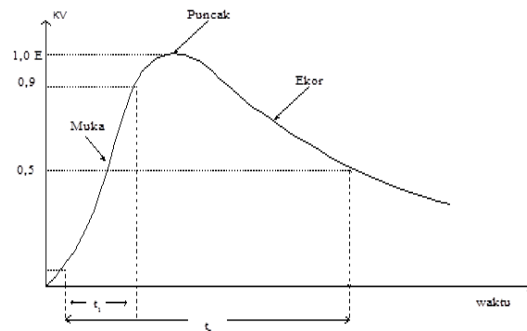
2.1 Surja Petir

Petir adalah pelepasan muatan yang terjadi antara awan, dalam awan atau antara awan dengan tanah. Dimana dalam awan terdapat muatan positif dan muatan negatif, jika muatan ini bertemu maka akan terjadi tarik menarik yang dapat menimbulkan kilat diawan, begitu juga kalau muatan negatif dan muatan negatif dekat akan terjadi tolak menolak, juga akan terjadi ledakan / kilat. Bumi merupakan gudang muatan positif maupun negatif, jika pelepasan muatan dari petir dekat dengan bumi, maka akan terjadi sambaran petir ke bumi. Bila petir mengenai langsung ke penghantar, kemungkinan besar penghantar tersebut akan putus karena gelombang petir yang menimbulkan tegangan impuls melebihi BIL (*Basic Insulation Level*) dari penghantar. Kalau petir yang mengenai penghantar bukan sambaran langsung tetapi induksi dari petir, gerak dari gelombang petir itu menjalar ke segala arah dengan perkataan lain terjadi gelombang berjalan sepanjang jaringan yang menuju suatu titik lain yang dapat menetralkan arus petir tersebut yaitu menuju ke titik pentanahan.



Gambar 2.1 Proses Terjadinya Petir

Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik standar gelombang surja petir, dimana t_1 menggambarkan waktu muka gelombang dan t_2 menunjukkan waktu ekor gelombang.



Gambar 2.2 Bentuk standar gelombang surja petir

Sambaran petir terdiri dari:

1. Sambaran Langsung

Sambaran langsung adalah sambaran petir ke arah fasa konduktor dan penunjang fasa konduktor (tiang). Tetapi, yang sering terjadi adalah sambaran petir yang langsung menuju fasa konduktor dari sistem tenaga. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan (probabilitas) dari sambaran petir menuju ke fasa konduktor lebih besar.

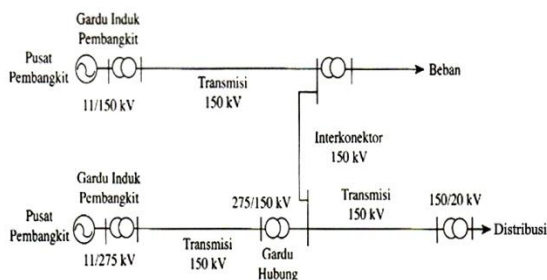
2. Sambaran Tidak Langsung

Sambaran tidak langsung adalah peristiwa sambaran petir yang terjadi di dekat sistem tenaga. Sambaran tersebut dapat berupa sambaran petir dari awan ke tanah ataupun sambaran petir dari awan ke awan. Biasanya sambaran petir ini lebih berpengaruh pada saluran tegangan menengah dibandingkan dengan saluran tegangan tinggi. Akibat adanya sambaran ini, akan timbul medan elektromagnetik yang dapat menginduksikan tegangan pada saluran sistem tenaga.

2.2 Gardu Induk

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sehingga diantara pembangkit dengan transmisi dibutuhkan trafo daya *step up*. Maka, semua perlengkapan yang terpasang di sisi sekunder trafo ini harus

mampu memikul tegangan tinggi. Sebaliknya, tegangan transmisi dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan tegangan dari ratusan volt sampai puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dengan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down*. Semua perlengkapan yang terpasang disisi primer trafo ini juga harus bisa memikul tegangan tinggi. Trafo – trafo daya ini bersama dengan perlengkapan – perlengkapannya disebut gardu induk.



Gambar 2.3 Diagram garis sistem tenaga listrik interkoneksi

2.3 Arrester

Arrester adalah suatu alat bagi pelindung suatu sistem tenaga listrik terhadap surja petir. Alat pelindung terhadap surja petir ini berfungsi melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah.

2.3.1 Prinsip Kerja Arrester

Pada keadaan tegangan jaringan normal, sampai 1,1 tegangan nominal pelindung berperan sebagai isolasi atau idealnya tidak mengalirkan arus dari jaringan tanah. Tetapi jika suatu tegangan lebih impuls tiba pada terminal alat pelindung, maka alat pelindung segera berubah menjadi penghantar dan mengalirkan arus impuls ke tanah sehingga amplitud tegangan lebih yang merambat menuju peralatan yang dilindungi berkurang menjadi dibawah ketahanan tegangan impuls peralatan yang dilindungi.

2.3.2 Bagian-bagian arrester

a. Elektroda

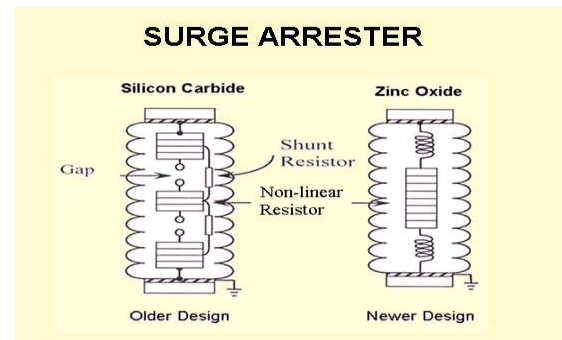
Terdapat dua elektroda pada *arrester*, yaitu elektroda atas yang dihubungkan dengan bagian yang bertegangan dan elektroda bawah yang dihubungkan ke tanah.

b. Spark gap

Apabila terjadi tegangan lebih oleh surja petir atau surja hubung pada *arrester* yang terpasang, maka pada spark gap atau sela percik akan terjadi busur api.

c. Tahanan Katup

Tahanan yang digunakan dalam *arrester* ini adalah suatu jenis material yang sifat tahanannya dapat berubah bila mendapatkan perubahan tegangan.

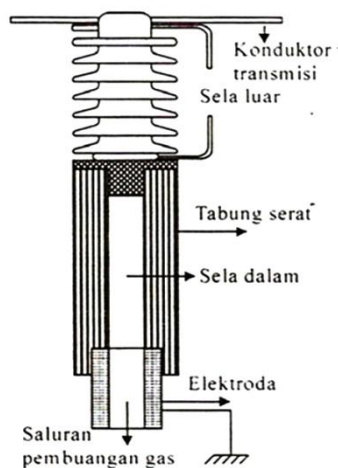


Gambar 2.4 Bagian – bagian Arrester

2.3.3 Jenis-Jenis Arrester

2.3.3.1 Arrester Jenis Ekspulsi

Digunakan pada sistem tenaga listrik bertegangan hingga 33 kV. Konstruksinya diperlihatkan pada gambar 2.5. *Arrester* ini mempunyai dua sela yang terhubung seri, yaitu sela luar dan sela dalam. Sela dalam ditempatkan di dalam tabung serat (Fiber), elektroda sela dalam yang dibumikan dibuat berbentuk pipa. Keberadaan dua pasang elektroda ini membuat *arrester* mampu memikul tegangan tinggi frekuensi daya tanpa menimbulkan korona dan arus bocor ke tanah. Tegangan tembus sela luar dibuat lebih rendah daripada tegangan lompatan api isolator pendukung sela luar.

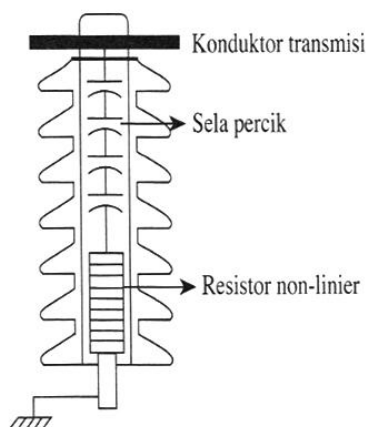


Gambar 2.5 Arrester jenis ekspulsi

2.3.3.2 Arrester Jenis Katup

Berdasarkan sela perciknya, *arrester* katup terdiri dari:

- *Arrester* Katup Sela Pasif
Arrester sela pasif digunakan pada jaringan distribusi hantaran udara.



Gambar 2.6 Arrester katup

Arrester ini terdiri dari sela percik, resistor nonlinier dan isolator tabung. Sela percik terdiri dari beberapa susunan elektroda plat – plat terhubung seri. Sela percik dan resistor nonlinier keduanya ditempatkan didalam tabung isolasi tertutup, sehingga kerja *arrester* ini tidak dipengaruhi oleh keadaan udara sekitar.

Resistor non-linier terbuat dari beberapa silikon karbida (silicon carbide) yang terhubung seri. Ukuran diameter piring kurang lebih 90 mm, sedangkan tebalnya kurang lebih 25

mm. Nilai resistansi resistor ini sangat besar ketika melewati arus lemah, tetapi nilai resistansinya sangat rendah ketika dilewati arus kuat.

- *Arrester* Katup Sela Aktif

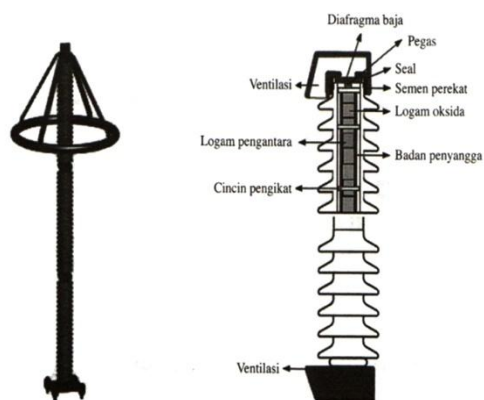
Arrester sela aktif digunakan pada jaringan tegangan tinggi dan titik pusat jaringan distribusi.

Konstruksi *arrester* katup sela aktif hampir sama dengan *arrester* katup sela pasif, perbedaannya terletak pada metode pemadaman busur api pada sela percik. Pada *arrester* katup sela aktif, untuk memadamkan busur api, yaitu memperpanjang dan mendinginkan busur api dengan cara membangkitkan medan magnet pada sela percik.

- *Arrester* Katup Tanpa Sela Percik

Arrester tanpa sela digunakan untuk semua tingkat tegangan.

Konstruksi *arrester* jenis tanpa katup diperlihatkan pada gambar 2.7. *Arrester* ini tidak menggunakan sela percik seperti halnya kedua *arrester* katup terdahulu, tetapi hanya menggunakan resistor *non-linier* yang terbuat dari logam oksida (*Metal Oxide*). Karena bahan utamanya adalah logam oksida, dalam praktik sehari-hari *arrester* ini dinamai *arrester MO*.



Gambar 2.7 Konstruksi *arrester* logam oksida

Berdasarkan penempatannya *arrester* katup terbagi dalam tiga jenis:

- *Arrester* Katup Jenis Gardu

Arrester katup jenis gardu ini adalah jenis yang paling efisien dan juga paling mahal. Perkataan “gardu” di sini berhubungan dengan pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar.

Umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian-rangkaian mulai dari 2.400 volt sampai 287 kV dan lebih tinggi.

- **Arrester katup Jenis Saluran**
Arrester jenis saluran ini lebih murah dari *arrester* jenis gardu. Kata “saluran” disini bukanlah berarti untuk perlindungan saluran transmisi. Seperti *arrester* jenis gardu, *arrester* jenis saluran ini juga dipakai pada gardu induk untuk melindungi peralatan yang kurang penting. *Arrester* jenis saluran ini dipakai pada sistem dengan tegangan 15 kV sampai 69 kV.
- **Arrester Jenis Gardu Untuk Mesin-mesin**
Arrester jenis gardu ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar. Pemakaiannya untuk tegangan 2,4 kV sampai 15 kV.
- **Arrester Katup Jenis Distribusi untuk Mesin-mesin**
Arrester jenis distribusi ini khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar dan juga untuk melindungi transformator dengan pendinginan udara tanpa minyak. *Arrester* jenis ini dipakai pada peralatan dengan tegangan 120 volt sampai 750 volt.

2.3.4 Syarat-Syarat Arrester

Agar pemakaian *arrester* dalam koordinasi dapat memberikan hasil yang maksimal maka harus mempergunakan azas berikut;

- Mempunyai tegangan dasar (*rated*) 50 c/s pada *arrester*, dipilih sedemikian rupa sehingga nilainya tidak dilampaui pada waktu dipakai, baik dalam keadaan normal maupun hubungan singkat.
- *Arrester* ini akan memberikan perlindungan bila ada selisih (*margin*) yang cukup antara tingkat *arrester* dan peralatan, daerah perlindungan harus mempunyai jangka (*range*) cukup untuk melindungi semua peralatan gardu yang mempunyai BIL yang sama dengan BIL yang harus dilindungi *arrester*, atau lebih tinggi dari daerah perlindungan.
- *Arrester* harus dipasang sedekat mungkin kepada peralatan utama dan tahanan tanahnya harus rendah.

- Kapasitas termis *arrester* harus dapat meneruskan arus besar yang berasal dari simpanan tenaga yang terdapat dalam saluran yang panjang.
- Jatuh tegangan maksimum dari *arrester* dipakai sebagai tingkat perlindungan *arrester* (bukan jatuh tegangan rata-rata).
- Sebuah harga tegangan pelepasan arus petir harus ditetapkan untuk menentukan tingkat perlindungan *arrester* yang harus dikordinasikan dengan BIL.
- Pengaruh dari sejumlah kawat (*multiple-lines*) dalam melindungi gangguan petir pada gardu perlu diperhatikan pengetrapan *arrester*.
- Bila ada keraguan mengenai 50 c/s dari *arrester*, maka sejumlah persentase ditambahkan pada harga yang dihitung atau ditetapkan untuk *arrester*. Sekarang masih dipakai tambahan 10% sebagai faktor keamanan, untuk menanggulangi kemungkinan bila *arrester* bekerja pada sebuah tegangan peralihan mungkin tertumpu pada 50 c/s: tegangan ini harus di interupsi oleh *arrester* tersebut.

2.3.5 Penempatan Arrester Pada Gardu Induk

Penempatan *arrester* pada gardu induk sangat penting diperhitungkan, berdasarkan *SPLN-7:1978* untuk sirkit ganda sistem tegangan 150 kV jarak antara *arrester* dan transformator tidak melebihi 80 meter dan untuk sirkit tunggal adalah seperdua dari jarak tersebut. Pada dasarnya untuk mengantisipasi terjadinya *flashover*, *Arrester* harus ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi dengan tujuan:

- Untuk mengurangi peluang tegangan impuls merambat pada kawat penghubung *arrester* dengan peralatan yang dilindungi.
- Saat *arrester* bekerja, gelombang tegangan impuls sisa merambat pada kawat penghantar transformator dengan *arrester* setelah gelombang itu tiba pada terminal transformator, gelombang tegangan tersebut akan dipantulkan, sehingga total tegangan terminal *arrester* dua kali tegangan sisa. Peristiwa ini dapat dicegah jika

arrester dapat dipasang langsung pada terminal transformator.

- Jika kawat penghubung *arrester* dengan transformator yang dilindungi cukup panjang, maka induktansi kawat itu harus diperhitungkan.

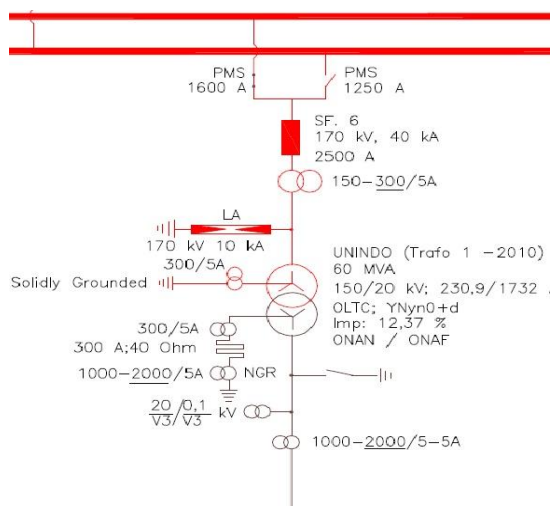
3. METODOLOGI

3.1 Langkah Penelitian

Langkah atau kerangka kerja yang dilakukan pada penelitian ini adalah menentukan obyek penelitian dengan menentukan batasan - batasan permasalahan, yang kemudian dilanjutkan dengan melakukan studi literatur, observasi lapangan, pengumpulan data dan kemudian melakukan suatu analisa terhadap data yang diperoleh.

3.2 Data Peralatan Terpasang

Single Line Diagram GI Teluk Betung pada Gambar 3.1 di bawah menunjukkan letak antara *arrester* dengan objek yang dilindungi (transformator daya).



Gambar 3.1 Letak *arrester* dan Objek yang dilindungi di G.I Teluk Betung

a. Spesifikasi Lightning *Arrester*

Merk	: ASEA
Tipe	: XAR 170A3/144
Tegangan Maksimum	: 170 kV
Tegangan Operasi	: 150 kV
Tegangan Nominal	: 144 kV
Class	: 10 kA
Impuls Petir	: 10/20 μ s
Tahanan	: 6,6 ohm

b. Spesifikasi Transformator Daya

Kapasitas	: 60 MVA
No Seri	: P060LEC594
Tahun Pembuatan	: 2010
Tahun Operasi	: 2011
Rasio	: 150/20
Arus Nominal	: 230,9/1732,1 A
Impedansi	: 12,37%

c. Konduktor

Jenis konduktor ACSR 527,60 mm². Jarak konduktor dari *arrester* ke transformator daya unit satu Gardu Induk Teluk Betung adalah 3 meter, jarak antara konduktor dengan permukaan tanah adalah 3 meter.

d. Tingkat Sambaran Petir di Lampung

Daerah Lampung adalah suatu daerah yang mempunyai kerapatan sambaran petir tinggi. Hal ini disebabkan karena terletak dekat dengan khatulistiwa dan berada pada daerah dimana angin monsun basah yang bergerak dari utara ke selatan mulai berbelok arah karena pengaruh perputaran bumi (gaya koriolis).

Di daerah operasi PLN UPT Tanjung Karang, G.I Teluk Betung Lampung banyak mengalami gangguan akibat sambaran petir. Curah petir di Bandar Lampung adalah 112 dan IKL 30,68.

3.3 Teknik Analisis

Teknik analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah teknik analisis statistik deskriptif. Di mana dalam penelitian ini akan dilakukan pengkajian terhadap data-data teknis yang diperoleh dari PT PLN (Persero) P3BS, UPT. Tanjung Karang, Gardu Induk Teluk Betung. Data-data yang telah didapatkan selanjutnya diolah dan akan dideskripsikan pada saat proses penganalisaan data.

3.3.1 Jumlah Sambaran Petir Ke Bumi

Jumlah sambaran petir ke bumi adalah sebanding dengan jumlah hari guruh pertahun atau disebut juga *iso keraunic level* (IKL) di daerah tersebut. Banyak para peneliti yang telah memberikan perhatian ke arah ini. Untuk menghitungnya bisa digunakan rumus berikut:

$$N = 0,15 \text{ IKL} \quad (3.1)$$

dimana:

N = Jumlah sambaran petir per km^2 per tahun

IKL = Jumlah hari guruh per tahun

3.3.2 Spesifikasi dan Klasifikasi

Arrester

Ditinjau dari penggunaannya, *arrester* terdiri dari tiga jenis:

1. Jenis gardu: dipasang pada sistem 3-312 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir diatas 100 kA. Digunakan untuk melindungi gardu induk dan transformator daya.
2. Jenis jaringan: dipasang pada sistem 20-73 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir 65-100 kA. Digunakan untuk melindungi transformator distribusi, transformator kapasitas rendah dan gardu kecil.
3. Jenis distribusi: dipasang pada sistem 8-15 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir dibawah 65 kA. Digunakan untuk melindungi transformator distribusi.

Spesifikasi *arrester* harus sesuai dengan kebutuhan pada sistem. Dilihat dari ada tidaknya sela percik, *arrester* terdiri dari 2 jenis, yaitu : *arrester* bersela, yaitu *arrester* yang memiliki sela percik; dan *arrester* tanpa sela.

a. Spesifikasi *arrester* dengan sela percik

Mengacu kepada standar IEC 60099-1, spesifikasi *arrester* dengan sela percik adalah :

- Tegangan Pengenal, yaitu tegangan efektif tertinggi frekuensi daya yang mungkin dipikul *arrester*. Untuk tegangan diatas 198 kV, tegangan pengenal *arrester* harus dapat dibagi 6.
- Arus Peluahan Nominal, menentukan klasifikasi *arrester* menurut kemampuannya mengalirkan arus peluahan 10/20 μs . Standar arus pelepasan nominal *arrester* adalah :
 - 1) 10 kA, 10/20 μs ; digunakan pada gardu induk, gardu induk yang berada dikawasan yang sering terjadi petir, dan pada sistem tegangan > 66 kV.
 - 2) 5 kA, 10/20 μs ; digunakan pada gardu bertegangan ≤ 66 kV.
 - 3) 2,5 kA, 10/20 μs ; digunakan pada sistem bertegangan ≤ 22 kV.

4) 1,5 kA, 10/20 μs ; digunakan pada sistem distribusi bertegangan ≤ 22 kV.

- Frekuensi Pengenal, sama dengan frekuensi sistem, 50 Hz atau 60 Hz.
- Tegangan percik frekuensi daya, yaitu besar tegangan efektif frekuensi daya yang membuat terjadinya percikan di sela *arrester*. Tegangan percik frekuensi daya harus tetap tinggi agar sela *arrester* tidak terpercik jika terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah maupun ketika terjadi operasi hubung-buka. Biasanya, tegangan percik frekuensi daya ditetapkan $\geq 1,5$ kali tegangan pengenal *arrester*.
- Tegangan Percik Impuls Petir Maksimum, yaitu puncak tegangan impuls 1,2/50 μs , yang membuat sela *arrester* pasti terpercik atau yang membuat *arrester* pasti bekerja.
- Tegangan Percik Muka Gelombang Impuls, yaitu tegangan yang membuat sela *arrester* terpercik dalam tenggang waktu muka gelombang impuls.
- Tegangan percik impuls hubung buka, yaitu puncak tegangan percik impuls hubung buka yang membuat sela *arrester* terpercik. Spesifikasi ini diberlakukan hanya untuk *arrester* bertegangan nominal diatas 200 kV.
- Ketahanan arus durasi panjang. Untuk *arrester* 10 kA. Kelas kerja (*heavy duty*) arus durasi panjang sama dengan arus yang diperoleh melalui pelepasan muatan generator arus impuls pada tegangan tidak kurang 50% daripada tegangan peluahan.
- Tegangan Sisa, yaitu tegangan pada terminal *arrester* saat *arrester* mengalirkan arus petir.
- Tegangan Gagal Sela. Jika tegangan pengenal suatu *arrester* adalah V_n , maka tegangan gagal selanya adalah besar tegangan yang membuat sela *arrester* tembus listrik saat dikenai tegangan impuls yang kecuraman muka gelombangnya $(100 \times V_n) / (12 \mu\text{s})$. Sebagai contoh tegangan pengenal suatu *arrester* adalah 30 kV dan tegangan gagal selanya adalah 120 kV. Artinya, sela *arrester* akan tembus listrik pada tegangan 120 kV, jika *arrester* ini dikenai impuls dengan

kecuraman muka gelombang ($100 \times 30 \text{ kV} / (12 \mu\text{s}) = 250 \text{ kV}/\mu\text{s}$).

- Karakteristik Tegangan-Arus, yaitu karakteristik yang menyatakan hubungan tegangan dan arus pada *arrester*.
- Margin, yaitu ketahanan suatu peralatan menahan tegangan impuls, jika dipasang pada suatu sistem bertegangan tertentu, disebut BIL (*Basic Insulation Level*). Selisih BIL peralatan yang dilindungi dengan tingkat proteksi *arrester* yang melindunginya biasanya diterapkan 20%-30% peralatan yang dilindungi.
- Panjang Dan Jarak Rambat Badan *Arrester*. Jarak rambat badan suatu *arrester* ditetapkan berdasarkan bobot polusi di lokasi pemasangan *arrester* tersebut. Hubungan bobot polusi dengan jarak rambat adalah :
 - 1) Bobot polusi ringan: 16 mm/kV
 - 2) Bobot polusi sedang: 20 mm/kV
 - 3) Bobot polusi berat: 25 mm/kV
 - 4) Bobot polusi sangat berat: 31mm/Kv

b. Spesifikasi *Arrester* Tanpa Sela Percik

Mengacu kepada IEC 60099-4, spesifikasi *arrester* tanpa sela percik adalah sebagai berikut:

- Tegangan Operasi Kontinu, yaitu tegangan maksimal yang dapat dipikul *arrester* secara terus menerus.
- Tegangan Nominal, yaitu tegangan efektif tertinggi yang mungkin dipikul oleh *arrester*.
- Tegangan Sisa, yaitu tegangan di terminal *arrester* saat *arrester* mengalirkan arus petir nominal.
- Tegangan Ketahanan Impuls Petir Maksimum, yaitu tegangan impuls petir yang dapat ditahan *arrester* tanpa membuat percikan. Tegangan ketahanan ini 1.3 kali dari tingkat proteksi impuls petir.
- *Thermal Runaway*, yaitu batas kehilangan energi pada *arrester* supaya tidak melebihi kemampuan disipasi panas semua komponen *arrester*. Jika kehilangan energi lebih besar daripada kemampuan disipasi panas *arrester* maka *arrester* akan mengalami *overheat*.
- *Arus Pelepasan*, yaitu arus maksimal yang dapat dialirkan oleh *arrester* tanpa

merusak *arrester* itu sendiri. Standar arus peluahan nominal *arrester*:

- 1) 10 kA, 10/20 μs , digunakan pada gardu induk, gardu yang berada di kawasan yang sering terjadi petir, dan pada sistem bertegangan $> 66 \text{ kV}$.
- 2) 5 kA, 10/20 μs , digunakan pada gardu bertegangan $\leq 66 \text{ kV}$.
- 3) 2,5 kA, 10/20 μs digunakan pada sistem bertangan $\leq 22 \text{ kV}$.
- 4) 1,5 kA, 10/20 μs digunakan pada sistem distribusi bertegangan $\leq 22 \text{ kV}$.

Standar diatas adalah untuk sistem yang bertegangan AC. Karena sistem bertegangan DC belum ditentukan standarnya maka arus peluahan rata rata untuk *arrester* DC mengambil standar terbesar 10 kA.

- Jarak Rambat Badan Suatu *Arrester*. Ditetapkan berdasarkan bobot polusi di lokasi pemasangan *arrester* tersebut. Hubungan bobot polusi dengan jarak rambat adalah:

- 1) Bobot polusi ringan: 16 mm/kV
- 2) Bobot polusi sedang: 20 mm/kV
- 3) Bobot polusi berat: 25 mm/kV
- 4) Bobot polusi sangat berat: 31mm/kV

3.3.3 Parameter-Parameter *Arrester*

Jenis *arrester* yang terpasang di GI Teluk Betung adalah jenis *arrester* tanpa sela percik, karena itu fokus pembahasan pada jurnal ini adalah *arrester* tanpa sela percik.

Agar proteksi oleh *arrester* sesuai dan tidak menimbulkan gangguan, maka poin-poin berikut perlu diperhatikan:

a. Tegangan Nominal

Tegangan Nominal adalah tegangan maksimum yang dapat dilewatkan dengan normal melalui jalur listrik tanpa perlu membuang tegangan surja ke *grounding*. Tegangan nominal dari *arrester* seharusnya lebih besar dari tegangan sistem.

Tegangan Nominal pada *arrester* harus menyesuaikan dengan tegangan pada sistem yang digunakan, maka tegangan nominalnya akan dihitung dengan persamaan:

$$E_r = \alpha \cdot \beta \cdot U_m \quad (3.2)$$

di mana:

E_r = Tegangan Dasar *Arrester* (kV)

α = Koefisien Pembumian
 β = Toleransi, guna memperhitungkan fluktuasi tegangan
 U_m = Tegangan Sistem Maksimum (kV)

b. Arus Pelepasan

Arus Pelepasan adalah arus maksimal yang dapat dialirkan oleh *arrester* tanpa merusak *arrester* itu sendiri:

- 1) Kelas arus 10 kA, untuk perlindungan gardu induk yang besar dengan frekuensi sambaran petir yang cukup tinggi dengan tegangan sistem di atas 70 kV.
- 2) Kelas arus 5 kA, untuk tegangan sistem di bawah 70 kV.
- 3) Kelas arus 2.5 kA, untuk gardu-gardu kecil dengan tegangan sistem di bawah 22 kV, dimana pemakaian kelas 5 kA tidak lagi ekonomis.
- 4) Kelas arus 1.5 kA, untuk melindungi trafo-trafo kecil.

Untuk arus pelepasan dalam peristiwa gelombang berjalan dapat ditunjukkan dengan persamaan 3.2 sebagai berikut:

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{Z} \quad (3.3)$$

dimana:

I_a = Arus Pelepasan (kA)

U_d = Tegangan Gel. Datang (kV)

U_A = Tegangan kerja / sisa (kV)

Z = Impedansi surja

$$Z = 60 \ln 2h / r \ (\Omega) \quad (3.4)$$

dimana:

h = tinggi kawat dari permukaan bumi (m)

r = jari jari kawat (m)

c. Tegangan Pelepasan

Tegangan pelepasan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir. *Arrester* dikatakan bekerja dengan baik jika tegangan pelepasan *arrester* ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi.

d. Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah nilai tegangan yang harus dapat dialirkan oleh *arrester* setelah nilai tegangan puncak. Tegangan sisa *arrester* dapat dicari dengan persamaan 3.5 berikut:

$$V = I \times R \quad (3.5)$$

dimana:

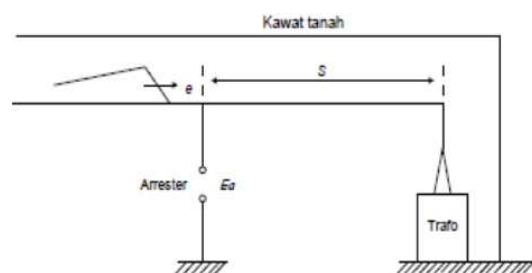
V = Tegangan sisa

I = Arus pelepasan

R = Tahanan dalam *arrester*

3.3.4 Penempatan *Arrester* Pada Gardu Induk

Penempatan *arrester* pada gardu induk terdapat di bay penghantar pada gardu induk dan bay transformator gardu induk. Tidak semua penempatan di gardu induk sama jaraknya terhadap transformator daya. Pada bay penghantar, jarak *arrester* terhadap transformator biasanya berkisar dari 20-30 meter. Ilustrasi jarak diberikan gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Jarak antara *arrester* dan transformator sebesar S

Untuk menghitung jarak yang tepat antara *arrester* dan transformator daya diberikan persamaan 3.6 berikut:

$$S = \frac{v (E_p - E_a)}{2 A} \quad (3.6)$$

dimana :

S = jarak antara *arrester* dengan transformator (m)

E_p = tegangan pada terminal transformator (kV)

E_a = tegangan percik *arrester* (kV)

A = kecuraman muka gelombang tegangan impuls (kV/ μ s)

v = kecepatan merambat gelombang (m/ μ s)

3.3.5 Tegangan Yang Tiba Pada Transformator Daya

Jarak *arrester* terhadap transformator daya unit satu pada Gardu Induk Teluk Betung adalah 3 meter. Tegangan yang tiba pada transformator dapat dihitung dengan persamaan 3.6 berikut:

$$E_p = E_a + 2 \frac{A S}{v}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Jumlah Sambaran Petir Di Bandar Lampung

Bandar Lampung merupakan daerah yang mengalami sambaran petir dengan kerapatan sambaran petir yang cukup tinggi, sehingga diperlukan perhatian lebih terhadap peralatan yang digunakan untuk memproteksi transformator daya dari surja petir. Dengan data Iso Keraunic Level (IKL) di atas jumlah sambaran petir di daerah GI Teluk Betung dapat kita hitung berdasarkan persamaan 3.1:

$$N = 0,15 \text{ IKL}$$

dimana:

N = jumlah sambaran petir per km² per tahun

$$\text{IKL} = 30,68$$

Sehingga:

$$N = 0,15 \times 30,68 = 4,602/\text{km}/\text{tahun}$$

4.2 Arrester Terpasang Pada GI Teluk Betung

Tegangan sistem pada G.I Teluk Betung adalah 150 kV. Ada beberapa faktor yang perlu diperhitungkan agar spesifikasi *arrester* memenuhi kriteria proteksi terhadap transformator daya.

4.2.1 Tegangan Pengenal

Suatu sistem yang bekerja pada keadaan tegangan maksimum umumnya tidak melebihi 1,1 kali tegangan nominal sistem. Dalam pemilihan *arrester* yang juga harus diperhatikan adalah koefisien pembumian, dimana faktor dari koefisien pembumian ini nilainya bergantung pada metode pembumian netral sistem, impedansi urutan positif, dan impedansi urutan nol sistem. Untuk sistem yang tidak dibumikan nilai koefisien pembumiannya adalah 1,0. Untuk sistem yang dibumikan efektif nilainya $\leq 0,8$. Untuk yang dibumikan tidak efektif nilai koefisien pembumiannya adalah 0,8 – 1,0. Sistem pentahanan pada Gardu Induk Teluk Betung adalah pembumian efektif. Untuk mendapatkan tegangan nominal *arrester* persamaan 3.2 digunakan:

$$E_r = \alpha \cdot \beta \cdot U_m$$

dimana :

$$\alpha = 0,8 \text{ (Koefisien Pembumian)}$$

$$\beta = 1,1 \text{ (Faktor Fluktuatif)}$$

$$U_m = 150 \text{ kV (Vnom)}$$

Sehingga:

$$E_r = \alpha \cdot \beta \cdot U_m$$

$$= 0,8 \times 1,1 \times U_m$$

$$= 0,8 \times 1,1 \times 150 \text{ kV}$$

$$= 132 \text{ kV}$$

Berdasarkan perhitungan diatas didapat bahwa tegangan nominal *arrester* yang harus dipasang adalah 132 kV. Tegangan nominal *arrester* terpasang pada GI Teluk Betung sisi HV transformator daya adalah 144 kV. Sehingga, *arrester* terpasang sudah sesuai berdasarkan tegangan nominalnya. Tegangan nominal *arrester* hendaknya mendekati hasil perhitungan, namun bila diatas nilai perhitungan akan lebih baik.

4.2.2 Arus Pelepasan Arrester

Tegangan gelombang datang menggunakan tegangan standar gelombang petir yang diasumsikan 1000 kV dan tegangan kerja *arrester* adalah 150 kV. Nilai tahanan dari *arrester* adalah 6,6 ohm. Jarak antara konduktor terhadap permukaan bumi adalah 3 meter, maka impedansi surja petir bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.4:

$$Z = 60 \ln 2h / r (\Omega)$$

dimana :

$$h = 3 \text{ (m) (Tinggi dari konduktor ke tanah)}$$

$$r^2 = \frac{527,60}{\pi} \text{ (Jari-jari konduktor)}$$

$$r = 12,96 \text{ mm} = 0,0129 \text{ m}$$

sehingga:

$$= 60 \ln 2h / r (\Omega)$$

$$= 60 \ln (2 \times 3 \text{ m} / 0,0129 \text{ m})$$

$$= 368,53 \Omega$$

Sehingga arus pelepasan *arrester* dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.3:

$$I_a = \frac{2 U_d - U_A}{Z}$$

dimana :

$$U_d = 1000 \text{ (kV)}$$

$$U_A = 132 \text{ (kV)}$$

$$I_a = \frac{2 \times 1000000 - 132000}{368,53}$$

$$= 5068,78 \text{ A}$$

Jadi *arrester* terpasang pada GI Teluk Betung yang ideal harus mampu melewati arus pelepasan dengan nilai minimal 5068,78 A. *Arrester* terpasang

pada GI Teluk Betung untuk transformator daya unit satu mempunyai batas arus pelepasan 10.000 A. Nilai ini telah sesuai dengan kebutuhan pada gardu induk tersebut. Apabila kapasitas arus pelepasan dari *arrester* semakin besar maka semakin baik perlindungan dari *arrester* tersebut.

4.2.3 Tegangan Sisa

Tegangan sisa atau *residual voltage* dihasilkan dari perhitungan dari persamaan 3.5:

$$V = I \times R$$

dimana:

$$I = 5068,78 \text{ A}$$

$$R = 6,6 \text{ ohm}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} V &= 5068,78 \text{ A} \times 6,6 \text{ Ohm} \\ &= 33,45 \text{ kV} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas tegangan sisa didapat 33,45 kV. Tegangan sisa *Arrester* terpasang pada GI Teluk Betung pada transformator daya unit satu adalah sebesar 460 kV sudah memenuhi kebutuhan proteksi.

4.2.4 Jarak Pemasangan *Arrester*

Pemasangan *Arrester* pada jarak tertentu pada GI Teluk Betung berpengaruh terhadap tegangan yang tiba pada terminal transformator. Jarak maksimum terhadap transformator bisa dihitung dengan persamaan 3.6:

$$S = \frac{v (E_p - E_a)}{2 A}$$

dimana:

$$E_p = 650 \text{ kV (BIL Trafo)}$$

$$E_a = 460 \text{ kV}$$

$$A = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

$$v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

$$S = \text{jarak (m)}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} S &= \frac{300 \text{ m}/\mu\text{s} (650 \text{ kV} - 460 \text{ kV})}{2 \times 1000 \text{ kV}} \\ s &= 28,5 \text{ meter} \end{aligned}$$

Sesuai perhitungan diatas didapat jarak maksimum antara *arrester* terhadap transformator daya adalah 28,5 meter. Semakin dekat jarak antara *arrester* dengan transformator maka semakin baik.

Semakin jauh jarak antara *arrester* terhadap transformator maka semakin besar pula tegangan pelepasan dari *arrester*.

Jarak *arrester* terpasang pada GI Teluk Betung adalah 3 meter, tegangan yang tiba pada transformator daya dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_p = E_a + 2 \frac{A S}{v}$$

dimana :

$$E_a = 460 \text{ kV}$$

$$A = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

$$S = 3 \text{ m}$$

$$v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Sehingga :

$$E_p = 460 \text{ kV} + 2 \frac{1000 \text{ kV}/\mu\text{s} \times 3 \text{ m}}{300 \text{ m}/\mu\text{s}}$$

$$E_p = 480 \text{ kV}$$

Berdasarkan perhitungan di atas didapat nilai tegangan pada terminal transformator adalah 480 kV. *Basic Insulation Level* (BIL) transformator daya unit satu GI Teluk Betung adalah 650 kV. Nilai tegangan yang tiba pada terminal transformator adalah dibawah nilai *Basic Insulation Level* (BIL) dari transformator. Sehingga perlindungan surja petir terhadap transformator daya unit satu pada gardu induk teluk betung dengan jarak 3 meter dikatakan sudah baik. Akan lebih baik lagi jika *arrester* dipasang dekat dengan terminal transformator, tetapi kendalanya dalam proses pemeliharaan *arrester* ataupun transformator daya, akan kesulitan karena terlalu berdampingan.

5. SIMPULAN

1. Spesifikasi *arrester* yang terpasang di sisi HV transformator daya unit satu Gardu Induk Teluk Betung telah memenuhi kriteria kebutuhan dari sistem untuk melindungi transformator daya dari surja petir, sehingga perlindungan yang diberikan *arrester* sudah optimal.
2. Penempatan *arrester* terhadap transformator daya unit satu Gardu Induk Teluk Betung telah sesuai

dengan standar. Perhitungan jarak maksimum *arrester* terhadap transformator daya adalah 28,5 meter, sedangkan di lapangan jarak antara *arrester* terhadap transformator adalah 3 meter, sehingga penempatan *arrester* di Gardu Induk Teluk Betung sudah optimum untuk mengamankan transformator daya dari surja petir.

REFERENSI

- Anonim. 1978. *Pedoman pemilihan tingkat isolasi transformator dan penangkal petir*. SPLN 7. PT. PLN (Persero).
- Anonim. 1996. *IEEE Guide for Direct Lightning Lightning Stroke Shielding of Substations*. IEEE Standard 998-1996.
- Anonim. 2014. *Buku Panduan Pemeliharaan Primer dan Sekunder Gardu Induk*. KEPDIR 0520. PT. PLN (Persero).
- Hutauruk, T.S. 1991. *Gelombang Berjalan Dan Proteksi Surja*. Erlangga. Jakarta
- Munandar A, Aris dan Kuwahara, S. 1973. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik, jilid III Gardu Induk*. Pradya Paramita. Jakarta
- Tobing, L., Bonggas. 2012. *Peralatan Tegangan Tinggi*, Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta
- Zoro, Reynaldo. 1986. *Masalah Tegangan Tinggi*. Institut Teknologi Bandung.