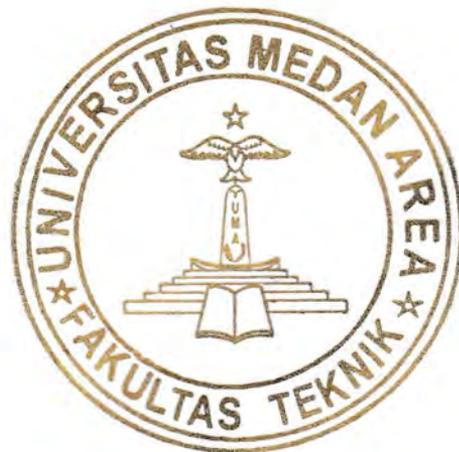


STUDI PENENTUAN TRANSMISI YANG EKONOMIS DI SUMATERA UTARA

Oleh :

Jimi Elis

No. Stb. : 94 812 0002



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
M E D A N
2000**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 11/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

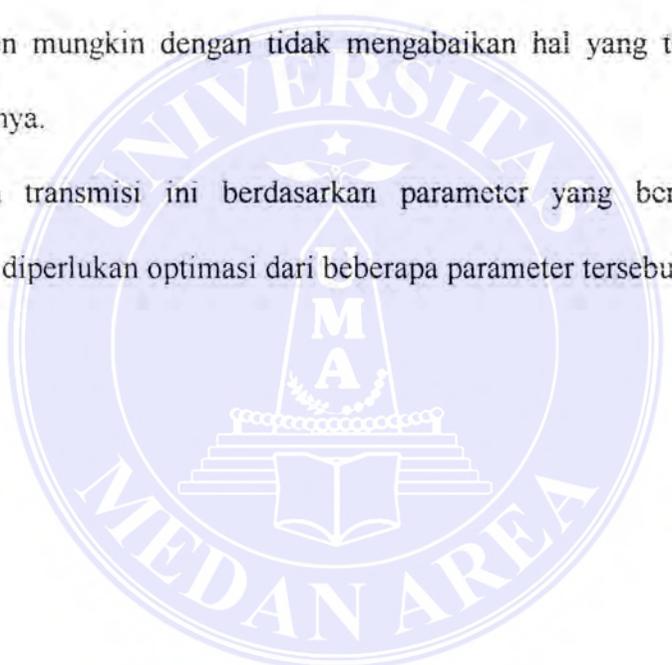
JIMI ELIS

ABSTRAK

“ Penentuan Transmisi Yang Ekonomis di Sumatera Utara ”.

Kata ekonomis sangat berkaitan dengan untung dan rugi, dimana pada penentuan transmisi ini penekanan pada pemilihan penghantar, penentuan jarak transmisi seefisien mungkin dengan tidak mengabaikan hal yang terpenting yaitu operasional nantinya.

Penentuan transmisi ini berdasarkan parameter yang berkaitan dengan transmisi. Hal ini diperlukan optimasi dari beberapa parameter tersebut.



DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
BAB I : PENDAHULUAN.....	1
BAB II : DASAR-DASAR PERHITUNGAN BIAYA TRANSMISI DAN GARDU INDUK	5
2.1. Saluran Transmisi	6
2.1.1. Biaya Investasi Saluran Udara	6
2.1.1.1. Pendukung	7
2.1.1.2. Isolator	8
2.1.1.3. Kawat Penghantar	9
2.1.2. Biaya Pengusahaan Saluran	13
2.1.3. Formulasi Matematis Biaya Transmisi Saluran Biaya..	14
2.2. Gardu Induk.....	15
2.2.1. Transformator Daya	15
2.2.1.1. Rating daya Transformator Daya.....	16
2.2.1.2. Rating Tegangan 1	16
2.2.2. Peralatan Penghubung.....	17
2.2.2.1. Pemutus Daya	17

2.2.2.2.1.1. Rating Tegangan Pemutus Daya.....	17
2.2.2.2.1.2. Rating Arus Normal.....	18
2.2.2.2.1.3. Rating Arus Pemutus Hubung Singkat.....	18
2.2.2.2. Saklar Pemisah.....	19
2.2.3. Arrester.....	19
2.2.3.1. Rating Tegangan Arrester.....	20
2.2.3.2. Karakteristik Proteksi.....	20
2.2.3.3. Rating Arus Pelepasan Nominal Arrester.....	21
2.2.4. Transformator Ukur.....	21
2.2.4.1. Transformator Arus.....	22
2.2.4.2. Transformator Daya.....	22
2.2.5. Rel Daya.....	23
2.2.6. Biaya Investasi Gardu Induk.....	24
2.2.7. Biaya Pengusahaan Gardu Induk.....	25
BAB III : OPTIMASI TRANSMISI TEGANGAN TINGGI.....	31
3.1. Perhitungan Biaya Transmisi Ekonomis.....	32
3.1.1. Luas Penampang Penghantar Ekonomis.....	33
3.1.2. Tegangan dan Arus Ekonomis.....	34
3.1.3. Imedansi Ekonomis Transmisi.....	36
3.1.4. Impedansi Karakteristik Transmisi.....	38
3.1.4.1. Induktansi Saluran Transmisi.....	39
3.1.4.2. Kapasitansi Saluran Transmisi.....	41

3.1.5.	Tegangan dan Daya Batas.....	41
3.1.6.	Penentuan Grafik Daya Sebagai Fungsi Jarak Transmisi.....	43
3.1.7.	Penentuan Luas Penampang Penghantar Ekonomis.....	46
3.2.	Persyaratan Teknis Penghantar	47
3.2.1.	Kemampuan Penyaluran Arus.....	48
3.2.2.	Interprensi Radio.....	49
BAB IV	: PENENTUAN PARAMETER TRANSMISI EKONOMIS DI SUMATERA UTARA	51
4.1.	Perkembangan Kelistrikan di Sumatera Utara.....	51
4.2.	Biaya Spesifik Transmisi.....	53
4.2.1.	Konstanta Biaya Penghantar Udara.....	54
4.2.2.	Biaya Rugi Rugi Penghantar Udara	55

BAB I

PENDAHULUAN

Perkembangan kelistrikan di Indonesia umumnya dan di Sumatera Utara pada khususnya menunjukkan peningkatan yang menyolok dalam periode sepuluh tahun terakhir ini.

Meningkatnya kebutuhan tenaga listrik baik dalam jumlah maupun daerah pelayanan ini menyebabkan diperlukan sistem kelistrikan yang tangguh dan memadai kualitas pelayanan, antara lain interkoneksi daerah pembangkitan, serta pemilihan tegangan transmisi yang tepat untuk mengurangi rugi-rugi transmisi.

Rugi-rugi pada sistem transmisi sebagian besar disebabkan oleh rugi-rugi pemanasan penghantar ($I^2 R$). jadi prinsip dasar pengurangan rugi-rugi ini adalah mengurangi resistansi penghantar, atau , mengurangi besar arus yang melalui penghantar , pemilihan penampang penghantar di satu pihak dibandingkan dengan sistem tegangan yang akan digunakan merupakan suatu kompromi yang lebih dititik beratkan pada masalah ekonomi. Semakin tinggi tegangan transmisi berarti rugi-rugi $I^2 R$ dapat dikurangi, tetapi biaya untuk masalah isolasi akan semakin besar, di lain pihak bila penampang penghantar semakin besar. Disini diperlukan optimasi untuk menentukan tegangan, arus dan luas penampang yang tepat dengan menekan biaya transmisi sekecil mungkin untuk itu perlu diketahui terlebih dahulu biaya-biaya untuk transmisi, termasuk biaya gardu induk yang berkaitan dengan sistem tegangan, arus dan penampang penghantar. Hubungan antara biaya

transmisi dengan parameter –parameter itu disebut konstanta ekonomis transmisi demikian pula untuk gardu induk.

Untuk menentukan konstanta-konstanta ekonomis transmisi perlu diketahui terlebih dahulu variasi biaya transmisi yang bergantung pada tegangan, arus dan luas penampang penghantar. Pada gardu induk, variasi biaya tergantung pada tegangan, arus dan daya. Jadi dengan mengetahui konstanta ekonomis transmisi dan gardu induk pada salah satu titiknya. Berdasarkan pemikiran ini maka dapat ditentukan tegangan, arus dan luas penampang penghantar ekonomis untuk suatu daya dan jarak transmisi. Bila tegangan transmisi dipakai sebagai suatu parameter, maka dapat disusun suatu grafik yang menggambarkan hubungan antara parameter, maka dapat disusun suatu grafik yang menggambarkan hubungan antara daya sebagai fungsi dari jarak transmisi.

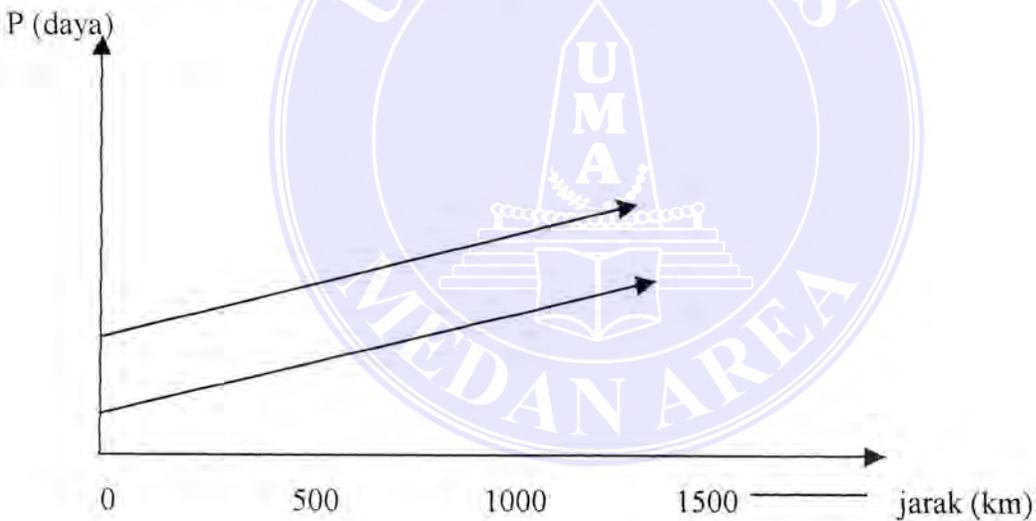
Penggunaan praktis dari grafik yang didapat adalah dalam menentukan tegangan transmisi yang ekonomis untuk suatu daya dan jarak transmisi tertentu, selanjutnya dapat ditentukan penampang ekonomis penghantar. Dari data-data tersebut dapat pula diperkirakan biaya sistem transmisinya.

Persyaratan teknis yang harus dipenuhi oleh persyaratan temperatur maksimum yang diijinkan terjadi pada penghantar. Interferensi radio.

kemampuan penyalur harus dibatasi oleh persyaratan temperatur maksimum yang diijinkan terjadi pada penghantar. Interferensi radio terjadi akibat gejala corona pada sistem transmisi tegangan ekstra tinggi dan batasan gangguan maksimum ditentukan berdasarkan SNR (Signal to Noise Ratio) minimum yang diukur pada jarak tertentu dari penghantar.

Dengan mengetahui persyaratan tekno-ekonomis ini maka diharapkan dapat dipakai sebagai dasar perencanaan pembangunan sistem transmisi di Sumatera Utara. Pembahasan mendetail mengenai persyaratan kestabilan sistem, regulasi tegangan serta pengaruh faktor daya tidak disertakan, karena masalahnya akan menjadi luas sekali.

Pada bagian ini hanya akan ditinjau sistem transmisi arus bolak balik tanpa membandingkan dengan sistem transmisi arus searah karena biaya transmisi arus bolak balik pada jarak ditinjau (samapai 1000 km) lebih murah bila dibandingkan dengan biaya sistem transmisi arus searah. Secara umum perbandingan biaya antara kedua sistem tersebut dapat dilihat pada gambar 1.1 berikut ini :



Gambar 1.1. Variasi biaya transmisi AC dan DC

Pada jarak diatas 1000 km sistem arus searah baru dapat bersaing dengan sistem arus bolak balik.

Tegangan transmisi yang diterapkan di Sumatera Utara adalah 150 kv sebagai contoh penggunaan dalam penentuan tegangan dan luas penampang penghantar yang

ekonomis, maka akan ditinjau sistem transmisi yang ada di PT. PLN (Persero).

PEMBANGKITAN DAN PENYALURAN SUMATERA BAGIAN UTARA.



BAB II

DASAR-DASAR PERHITUNGAN BIAYA TRANSMISI DAN GARDU INDUK

Energi listrik biasanya dibangkitkan dari pusat-pusat pembangkit yang letaknya jauh dari konsumsi listrik oleh karena itu dibutuhkan sistem transmisi sebagai media penyaluran energi listrik ini. Dalam proses penyaluran energi listrik, gardu induk berfungsi sebagai titik simpulnya, baik pada sisi pembangkit maupun pada sisi beban, sehingga dalam perhitungan biaya penghantar energi listrik maka biaya untuk gardu induk harus disertakan pula selain biaya transmisi.

Biaya transmisi dan gardu induk terdiri dari biaya investasi pada saat pembangunan, biaya rugi rugi daya dan biaya pengusahaan selama umur ekonomis yang direncanakan. Ada dua metode yang dapat dipakai untuk menjumlahkannya, yaitu metode nilai tunai (Present worth metode) dan metode nilai tahunan (Annual worth metode). Pada metode nilai tunai biaya untuk rugi rugi daya serta biaya pengusahaan setiap tahun diubah menjadi biaya modal dan dijumlahkan dengan biaya investasi awal. Pada metode tahunan, biaya investasi awal diubah menjadi biaya tahunan dan dijumlahkan dengan biaya rugi rugi daya dan biaya pengusahaan tahunan. Pada koloqium ini digunakan metode nilai tunai karena penjabaran biaya transmisi dan gardu induk dalam hubungannya dengan parameter tegangan, arus dan daya akan lebih mudah.

2.1. Saluran Transmisi

Ada dua kategori saluran transmisi yaitu saluran udara dan saluran bawah tanah. Pada saluran udara energi listrik disalurkan melalui kawat-kawat penghantar yang digantung pada tiang-tiang transmisi dengan perantaraan isolator-isolator, sedang pada saluran bawah tanah energi listrik disalurkan melalui kabel-kabel bawah tanah.

Pemilihan jenis transmisi tergantung pada jarak antara pembangkit dan pusat beban, umumnya transmisi untuk daya besar menggunakan saluran udara sedang kabel bawah tanah digunakan pada daerah padat beban, yaitu pada daerah perkotaan atau kawasan industri. Perbedaan mendasar dari penggunaan kabel dan saluran udara adalah masalah ruang dan biaya investasi. Pada koloqium ini hanya diselidiki transmisi saluran udara yang dipergunakan di Sumatera Utara sebagai sistem transmisi tegangan tinggi.

2.1.1. Biaya Investasi Saluran Udara

Komponen utama saluran udara adalah :

- i. Pendukung berupa tiang atau menara, tergantung pada tegangan kerja.
- ii. Isolator, berupa isolator penumpu, isolator gantung atau isolator penegang untuk mendukung konduktor dan menahannya. Jadi isolator ini harus mampu menahan gaya mekanis akibat berat konduktor serta mampu mengisolasi menahan tegangan kerja konduktor.
- iii. Penghantar, terbuat dari tembaga, aluminium.

Secara umum karakteristik dasar dari masing-masing komponen utama tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

2.1.1.1. Pendukung

Karakteristik dasar yang harus dipenuhi oleh pendukung adalah tinggi kekuatan mekanisnya, murah, ringan biaya perawatan yang rendah, berumur panjang, indah dipandang dan mudah untuk penarikan konduktor. Berbagai macam type menara pendukung yaitu dari jenis kayu, baja dan beton bertulang.

- a) Tiang kayu. Pendukung jenis ini murah, mudah di dapat, memenuhi persyaratan sifat isolator, umumnya tiang kayu direncanakan yang elastis, sehingga gaya longitudinal pada kedua sisi akibat berat konduktor dianggap sama. Bila salah satu konduktor pada salurannya putus, maka gaya longitudinal antara kedua sisinya tidak seimbang, oleh karena itu tiang kayu biasanya digunakan untuk jaringan distribusi atau transmisi tegangan menengah dengan jarak gawang yang pendek (kira-kira 60 cm).
- b) Tiang baja. Tiang jenis ini mempunyai kekuatan mekanis lebih besar daripada tiang kayu, sehingga jarak gawang dapat lebih panjang (60 – 80 cm) tetapi harganya lebih mahal, umurnya juga lebih panjang dari pada tiang kayu.
- c) Tiang beton. Tiang beton tidak memerlukan perawatan, sifat isolasinya baik, tahan terhadap reaksi kimia, kuat jarak gawangnya bisa panjang (80 – 200 m) dan umurnya panjang. Tinggi dari pendukung transmisi tergantung dari daerah bebas yang dibutuhkan di atas permukaan tanah.

2.1.1.2. Isolator

Isolator digunakan untuk menopang konduktor, saluran udara dan harus mampu melindunginya dari arus bocor ke bumi. Jadi isolator harus mempunyai sifat-sifat kuat menahan beban mekanis konduktor permitifitas relatif yang tinggi untuk mendapat kekuatan dielektrik yang besar, ketahanan isolasi yang tinggi untuk menghindari arus bocor dan tidak berubah sifatnya bila terjadi perubahan temperatur.

Bahan-bahan isolator yang memenuhi persyaratan di atas adalah porselin, gelas dan magnesium silikat, umumnya digunakan porselin karena kekuatan mekanisnya lebih besar daripada gelas, tidak mudah terjadi penimbunan kotoran pada permukaannya dibandingkan dengan gelas, sehingga bocor permukaan lebih kecil, magnesium silikat mempunyai kekuatan mekanis lebih besar dibandingkan dengan porselin.

Jenis isolator menurut penggunaan dan konstruksinya dibagi menjadi isolator gantung, jenis pusat dan jenis batang panjang.

a). Isolator gantung

Sesuai dengan namanya, isolator gantung diletakkan pada suatu lengan dan konduktor saluran dipasang pada bagian yang paling bawah. Dikenal dua jenis isolator gantung, yaitu clevis type yang menggunakan pasak untuk sambungannya.

Jumlah isolator dalam suatu rangkaian isolator gantung tergantung pada tegangan kerja, maka dibutuhkan isolator lebih banyak dengan cara menyambungannya menjadi suatu gandengan. Gandengan isolator gantung biasanya dipergunakan pada saluran transmisi tegangan tinggi di atas 50 Kv. Bagian utama dari isolator gantung

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 11/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)11/12/23

adalah fleksibel terhadap perubahan tegangan sistem dengan mengubah jumlah isolator, kerusakan pada salah satu isolator dapat diganti tanpa perlu mengganti seluruhnya.

b). Isolator Pasak ✓

Isolator pasak direncanakan untuk dipasang pada lengan tiang transmisi dengan menggunakan pasak atau pin, jenis ini dipergunakan sendiri, tidak dalam gandingan dan kekuatan mekanisnya rendah sehingga umumnya isolator pasak dipergunakan untuk tegangan rendah di bawah 30 Kv.

c). Isoaltor Batang Panjang

Isolator jenis batang panjang terdiri dari keping-keping porselen yang tersusun menjadi satu berupa batangan yang panjang. Jenis ini mempunyai bagian logam yang sedikit, sehingga tidak mudah rusak oleh adanya reaksi kimia, bentuk rusuknya yang sederhana memudahkan isolator ini tercuci oleh hujan, sehingga jenis ini sesuai sekali untuk penggunaan pada tempat-tempat yang banyak dikotori garam dan debu.

Dalam perencanaan isolasi saluran transmisi, tegangan merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah isolator dan jarak isolator, disamping faktor berat konduktor yang menentukan kekuatan mekanis dari isolator yang diperlukan.

2.1.1.3. Kawat Penghantar

Penghantar saluran transmisi berupa kawat tanpa isolasi (telanjang), yang padat (solid), berlilit (stranded atau berongga) dan terbuat dari logam biasa, logam campuran atau logam paduan.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

Menurut konstruksinya kawat padat adalah kawat tunggal yang padat (tak berongga) dan berpenampang bulat. Jenis ini hanya dipakai untuk penampang yang kecil karena sukar ditangani dan kurang fleksibel.

Berdasarkan bahannya kawat penghantar dapat dibagi menjadi kawat dari logam biasa, kawat dari logam campuran dan logam paduan. Kawat dari logam biasa dibuat dari logam seperti tembaga, aluminium, besi dan sebagainya. Kawat logam campuran adalah penghantar dari tembaga atau aluminium yang diberi campuran dalam jumlah tertentu dari logam jenis lain untuk menaikkan kekuatan mekanisnya. Kawat logam paduan adalah penghantar yang terdiri dari dua jenis logam atau lebih yang dipadukan dengan cara kompresi, peleburan atau pengelasan.

Beberapa jenis penghantar tersebut adalah sebagai berikut :

a). Kawat tembaga tarikan (hard drawn copper)

Penghantar jenis ini cukup banyak digunakan pada saluran transmisi karena konduktifnya tinggi dan kuat tariknya cukup tinggi.

b). Kawat aluminium tarikan

Aluminium lebih murah dan ringan, tetapi konduktifitasnya serta kuat tariknya lebih rendah dibandingkan dengan tembaga. Untuk tahanan yang sama diameternya lebih besar dari diameter tembaga, demikian juga koefisien muai panjangnya.

c). ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

ACSR terdiri dari inti baja dan dilindungi oleh lapisan konduktor aluminium, inti baja dipakai untuk menahan tarikan mekanis, sedangkan konduktor aluminium dipakai untuk menyalurkan arus yang besar.

Dibandingkan dengan kawat tembaga tarikan, konduktifitas ACSR lebih rendah, tetapi kekuatan mekanisnya lebih tinggi sehingga jarak gawangnya bisa lebih panjang, demikian juga diameter luarnya lebih besar dibandingkan dengan kawat tembaga tarikan untuk tahanan yang sama, sehingga ACSR cocok untuk transmisi tegangan tinggi dilihat dari segi corona.

Pemilihan jenis dan penampang penghantar tergantung pada sistem tegangan dan arus yang akan dilakukan. Pada sistem transmisi tegangan tinggi dengan daya besar dibutuhkan penghantar yang mempunyai kekuatan mekanis besar karena jarak gawang yang panjang serta konduktifitas yang cukup tinggi untuk mengurangi rugi rugi ohmic.

Untuk suatu jenis penghantar tertentu, biaya penghantar sebanding dengan beratnya, dan berat penghantar ini sebanding dengan luas penampangnya sehingga dapat dikatakan biaya untuk penghantar sebanding dengan luas penampangnya.

Biaya investasi saluran udara terdiri dari biaya untuk pembelian komponen utama dan biaya pembangunan. Dari uraian terdahulu tampak bahwa biaya untuk pembelian komponen utama tergantung pada sistem tegangan transmisi dan berat (luas penampang) penghantar. Biaya pembangunan saluran udara terdiri atas biaya pembebasan tanah, biaya pendirian pendukung transmisi, biaya penarikan penghantar

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 11/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)11/12/23

dan biaya pembuatan fondasi pendukung. Biaya pembebasan tanah tergantung pada lintasan transmisi. Pada daerah yang kering dan gersang serta jauh dari perumahan maka biaya pembebasan tanah bisa dianggap nol, tetapi untuk saluran yang melintasi daerah penduduk maka biaya pembebasan tanah cukup tinggi. Biaya pembebasan tanah tidak tergantung pada sistem tegangan maupun berat penghantar, tetapi tergantung pada lokasi lintasan saluran sehingga dalam penyusunan perhitungan biaya investasi saluran dianggap sebagai biaya tetap berdasarkan perkiraan biaya rata-rata pembebasan tanah perkilometer. Biaya pendirian pendukung transmisi dan biaya pembuatan pondasinya tergantung pada jenis pendukung yang ditentukan oleh tegangan transmisi dan berat penghantar sedangkan biaya penarikan kawat tergantung pada tinggi pendukung dan berat penghantar.

Dari hal-hal tersebut di atas dapat disusun suatu bentuk persamaan matematis untuk menyatakan hubungan-hubungan fungsional linier antara biaya investasi saluran udara perkilometer dengan variabel-variabel tegangan dan luas penampang penghantar sebagai berikut :

$$L = L_0 + L_1U + L_2S \text{ (Rp/Km)} \dots\dots\dots (2.1.)$$

L_0 = Biaya tetap perkilometer (Rp/Km)

L_1 = Koefisien korelasi antara biaya saluran udara dengan tegangan transmisi (Rp/V/Km).

L_2 = Koefisien korelasi antara biaya saluran udara dengan luas penampang penghantar (Rp/mm²/Km).

U = Tegangan transmisi (V)

S = Luas penampang penghantar (mm²)

2.1.2. Biaya Pengusahaan Saluran Udara

Biaya pengusahaan saluran udara adalah biaya-biaya yang dikeluarkan tiap tahun untuk keperluan pemeliharaan jaringan dan biaya untuk rugi rugi energi pada saluran transmisi. Termasuk dalam biaya pemeliharaan jaringan adalah biaya pemeriksaan, perbaikan, perlengkapan, material cadangan, sedangkan untuk biaya rugi rugi energi adalah biaya ekuivalen. Akibat kerugian hilangnya daya ohmic (I^2R) dan rugi corona. Biaya pemeliharaan jaringan sangat kecil bila dibandingkan dengan rugi rugi energi, sehingga dalam perhitungan biaya pengusahaan saluran udara yang dihitung adalah biaya untuk rugi rugi energi pada sistem transmisi.

Rugi rugi energi pada saluran udara terjadi akibat rugi rugi corona dan rugi – rugi panas ohmic. Rugi rugi corona terjadi pada sistem transmisi tegangan ekstra tinggi akibat gejala corona.

Dalam perencanaan saluran transmisi tegangan tinggi rugi rugi corona jarang diperhitungkan karena rugi rugi corona sangat kecil bila dibandingkan dengan rugi rugi ohmic, sehingga dalam hal ini hanya rugi rugi ohmic yang diperhitungkan.

Rugi rugi ohmic tahunan untuk saluran transmisi tiga fasa perkilometer adalah :

$$J_1 = 3 I^2 R h \quad (\text{wh/Km})$$

Bila harga rugi-rugi energi per wh adalah k, maka biaya rugi rugi ohmic pertahun adalah :

$$J_2 = 3 I^2 R h k \quad (\text{Rp / Km})$$

$$J_2 = 3 \frac{r}{S} h k I^2$$

$$J_2 = \frac{J_0}{S} I^2 \dots\dots\dots(2.2.)$$

dengan $J_0 = 3 r h k$

$r = RS$

$r =$ Tahanan penghantar perkilometer dengan luas penampang 1 mm² (Ωmm^2)

$R =$ Tahanan AC penghantar perkilometer pada temperatur kerja (Ω)

$h =$ Jumlah jam kerja tahunan (jam)

$k =$ Harga rugi rugi energi per watt jam (Rp/wh)

$S =$ Luas penampang penghantar (mm²)

2.1.3. Formulasi Matematis Biaya Transmisi Saluran Udara

Perhitungan biaya transmisi merupakan penjumlahan biaya investasi dan biaya perusahaan tahunan. Untuk menjumlahkannya dipergunakan metode nilai tunai yaitu mengubah biaya perusahaan tahunan menjadi biaya modal dan dijumlahkan dengan biaya investasi.

Dari persamaan (2.1) dan (2.2) didapat :

$$L = L_0 + L_1U + L_2S + (P/A, i\%, n), \frac{J_0}{S} I^2 (\text{Rp/Km}) \dots\dots\dots(2.3)$$

(P/A), i%, n) berharga konstan untuk suatu tingkat bunga i umur ekonomis n tertentu. Jadi persamaan (2.3) dapat diubah menjadi :

$$L = L_0 + L_1U + L_2U + \frac{Jt}{S} I^2 \text{ (Rp / Km)(2.4)}$$

$$J_t = (P / A, i\%, n) J_0$$

2.2. Gardu Induk

Gardu Induk merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan dan mengatur aliran daya dalam sistem tersebut.

Pada dasarnya, gardu induk terdiri dari sejumlah saluran masuk dan saluran keluar yang dihubungkan dengan sistem rel daya dengan diperlengkapi peralatan-peralatan utama, diantaranya transformator daya, peralatan penghubung, peralatan ukur dan peralatan bantu lainnya. Untuk melakukan pemilihan peralatan gardu induk maka harus diketahui karakteristik peralatan tersebut dalam hubungannya dengan besaran-besaran listrik.

2.2.1. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang berfungsi memindahkan daya dari suatu rangkaian ke rangkaian yang lain, pada tingkat tegangan yang berbeda. Sesuai dengan fungsinya transformator daya ditempatkan di pusat-pusat pembangkit dan di gardu induk yang masing-masing digunakan untuk menyalurkan dari dari pusat pembangkit sampai ke pusat beban.

Pada transformator daya dikenal dua macam rating untuk menyatakan kemampuannya, yaitu rating daya dan rating tegangan .

2.2.1.1. Rating Daya Transformator Daya

Output suatu transformator daya dinyatakan dalam rating KVA (Kilo Volt Ampere) atau MVA (Mega Volt Ampere). Rating MVA menunjukkan besarnya MVA daya yang dapat ditransformasikan pada rating tegangan sekunder tanpa melampaui kenaikan temperatur yang diperkenankan.

Untuk transformator daya 1 fasa, $MVA = V_2 I_2 \times 10^{-3}$

Untuk transformator daya 3 fasa, $MVA = \sqrt{3} V_2 I_2 \times 10^{-3}$

V_2 = rating tegangan sekunder (KV)

I_2 = rating arus sekunder (A)

Rating daya merupakan harga daya yang dijadikan dasar disain transformator daya dan menentukan pula harga rating arus yang diperkenankan mengalir pada rating tegangannya.

2.2.1.2. Rating Tegangan Transformator Daya

Disamping kapasitas daya, standard rating tegangan sistem ikut pula menentukan dalam disain transformator daya. Standard rating tegangan yang direkomendasikan oleh IEC untuk sistem tegangan tinggi adalah seperti berikut :

Tabel 2.1.

No.	Tegangan Nominal (KV)	Tegangan (KV)	Tegangan Maksimal (KV)
1.	220	230	245
2.	275	287	300
3.	330	345	362
4.	380	400	420
5.	500	510	525
6.	700	750	765

Tegangan maksimum adalah tegangan tertinggi yang harus mampu ditahan oleh transformator daya secara terus menerus. Harga tegangan maksimum ini berkisar antara 105 – 110% dari tegangan nominal.

2.2.2. Peralatan Penghubung

Peralatan penghubung pada gardu induk terdiri dari pemutus daya (Circuit breaker), saklar pemisah (disconnecting switch) dan saklar beban (load break switch). Pemakaian saklar beban jarang dipergunakan pada gardu induk tegangan tinggi pada bagian ini tidak akan dibahas.

2.2.2.1. Pemutus Daya

Pemutus daya merupakan peralatan penting dalam sistem tenaga listrik. Fungsi pemutus daya adalah menutup rangkaian, mengalirkan dan memutuskan arus bebas serta memutuskan arus gangguan secara otomatis, untuk menjalankan fungsi tersebut, pemutus daya harus mampu menutup dan mengalirkan beban penuh untuk waktu yang lama, menginterupsi gangguan secara cepat, mampu menahan arus gangguan pada waktu tertentu, oleh karena itu dikenal beberapa macam rating untuk pemutus daya diantaranya adalah :

2.2.2.1.1. Rating Tegangan Pemutus Daya

Rating tegangan pemutus daya menunjukkan batas tegangan sistem tertinggi yang diijinkan bekerja pada pemutus daya. Standar tegangan menurut IEC untuk tegangan di atas 72,5 KV, adalah : 100, 123, 145, 170, 245, 300, 362, 420, 525, 765

KV. Harga tegangan standard ini didasarkan pada ketinggian operasi 1000 meter

(3300 feet) atau kurang bila bekerja pada ketinggian yang lebih besar, maka tegangan kerja maksimum tidak boleh melampaui rating tegangan yang dirancang dikalikan dengan faktor koreksi, semakin tinggi suatu tempat, kerapatan udara relatif semakin turun sehingga tegangan flash over juga menurun.

Tabel 2.2.
Faktor Koreksi Tegangan Terhadap Ketinggian Operasi
dari Pemukaan Laut

No.	Ketinggian (feet)	Faktor Koreksi Tegangan
1.	3300	1,00
2.	4000	0,98
3.	5000	0,95
4.	10000	0,80

2.2.2.1.2. Rating Arus Normal

Rating arus normal pemutus daya adalah harga arus efektif yang mampu dialirkan oleh pemutus daya secara terus menerus dengan kenaikan temperatur tidak melampaui yang diperkenankan.

Standard rating arus normal pemutus daya yang direkomendasikan oleh IEC adalah : 400, 630, 800, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000 dan 6300 Amper.

2.2.2.1.3. Rating Arus Pemutus Hubung Singkat

Rating arus pemutus hubung singkat adalah harga arus total hubung singkat terbesar yang mampu diputuskan oleh pemutus daya dengan aman. Arus pemutus hubung singkat ini terdiri dari komponen searah dan komponen bolak-balik. Harga

UNIVERSITAS MEDAN AREA

efektif yang direkomendasikan oleh IEC adalah : 6 ; 3 ; 8 ; 10 ; 12,5 ; 20 ; 25 ; 3,5
40 ; 50 ; 63 ; 80; 100 KA.

2.2.2.2. Saklar Pemisah

Saklar pemisah merupakan peralatan hubung yang bekerja (membuka atau menutup) pada saat tidak berbeban atau pada arus yang kecil sekali, misalnya arus eksitasi pada transformator daya. Pada saklar pemisah dikenal beberapa rating sebagai standard yaitu : rating arus normal, rating arus ketahanan hubung singkat, rating tegangan. Besarnya rating arus normal dan rating tegangan sama dengan rating pada pemutus daya, sedang rating arus ketahanan hubung singkat menurut standard IEC adalah : 8 ; 10 ; 12,5 ; 20 ; 25 ; 31,5 ; 40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 KA.

2.2.3. Arrester

Arrester berfungsi untuk mengamankan gardu induk dari sambaran kilat ataupun tegangan lebih switching dengan jalan melakukan surya tegangan lebih yang terjadi. Komponen utama dari Arrester adalah sela api dan tahanan tidak linier yang dihubungkan secara seri. Fungsi sela api adalah sebagai saklar untuk melakukan surya tegangan lebih yang melalui arrester, dan segera berfungsi sebagai isolator setelah kembali ke keadaan normal.

Untuk dapat menggunakan arrester secara tepat maka harus diketahui karakteristik dasar dari arrester yaitu rating tegangan, karakteristik proteksi dan rating arus pelepasan nominal.

2.2.3.1. Rating Tegangan Arrester

Arrester merupakan peralatan yang sangat peka terhadap tegangan, karena itu rating tegangan arrester pada frekwensi daya merupakan rating yang penting.

Rating tegangan arrester adalah harga efektif maksimum tegangan frekwensi daya yang diukur antara saluran dengan terminal tanah arrester untuk menilik arrester yang sesuai dengan tegangan sistem, harus diketahui sistem pertanahan dari sistem tersebut. Besarnya rating tegangan ini dipengaruhi oleh besarnya tegangan fasa ke tanah pada saat terjadi gangguan.

Untuk sistem tiga fasa yang ditanahkan secara efektif, tegangan fasa ke tanah dari fasa sehat pada saat terjadi gangguan hubung singkat ke tanah tidak akan melampaui 80% tegangan maksimum sistem fasa ke fasa, sedangkan sistem yang ditanahkan secara tidak efektif tegangan fasa sehat dapat melampaui 80% tegangan maksimum fasa ke fasa. Pada sistem yang tidak ditanahkan harga tegangan fasa ke tanah dari fasa sehat ke tanah saat terjadi gangguan hubung singkat dapat sama dengan tegangan maksimum fasa ke fasa.

2.2.3.2. Karakteristik Proteksi Arrester

Karakteristik proteksi digunakan untuk mendapatkan korelasi antara arrester dengan peralatan sistem yang diproteksi. Bentuk karakteristik ini dinyatakan dalam tegangan percikan (spark over) dan tegangan pelepasan (discharge).

Tegangan percikan harus mempunyai harga yang cukup tinggi untuk mengurangi seminimum mungkin kegagalan sela, disebabkan oleh adanya hubung singkat ke tanah atau suna switching.

Ada beberapa macam tegangan percikan yaitu :

- a. Tegangan percikan pada frekwensi daya, yaitu tegangan efektif pada frekwensi daya yang dapat menimbulkan percikan pada sela api.
- b. Tegangan percikan impuls kilat, yaitu tegangan maksimum yang dicapai sebelum timbul percikan bila gelombang impuls kilat diterapkan pada terminal arrester.
- c. Tegangan percikan impuls switching, yaitu tegangan maksimum yang dicapai sebelum terjadi percikan bila gelombang impuls switching diterapkan pada terminal arrester.

Tegangan pelepasan, disebut juga tegangan sisa, adalah tegangan antara terminal-terminal arrester selama arrester sedang melakukan arus surya.

Dengan mengetahui karakteristik tegangan percikan dan tegangan pelepasan, maka dapat diperkirakan karakteristik proteksi untuk segala macam rating arrester, dalam bentuk tegangan percikan dan tegangan pelepasan.

2.2.3.3. Rating Arus Pelepasan Nominal Arrester

Arus pelepasan adalah arus surya yang mengalir pada arrester sesaat setelah terjadi percikan api pada sela api. Standard arus pelepasan nominal yang diberikan oleh IEC adalah : 10.000 ; 5.000 dan 1.500 Ampere standrd arus pelepasan ini dipakai untuk menentukan klasifikasi arrester berdasarkan penggunaannya.

2.2.4. Transformator Ukur

Transformator ukur merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah besaran arus atau tegangan pada rangkaian sistem tenaga listrik menjadi besaran yang sesuai

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 11/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)11/12/23

dengan kemampuan alat ukur dan proteksi. Ada dua macam transformator ukur yaitu transformator arus dan transformator tegangan.

2.2.4.1. Transformator Arus

Transformator arus berfungsi untuk menurunkan arus primer yang besar pada sistem tenaga listrik menjadi arus sekunder yang kecil yang dipergunakan untuk pengukuran. Pada transformator arus dikenal beberapa macam rating yaitu rating arus, rating keluaran (output) dan rating tingkat isolasi.

a. Rating arus

Transformator arus didisain untuk standard arus 1 ; 2 dan 5A untuk sisi sekundernya (standard IEC) rating arus primer menurut standard IEC adalah : 10 ; 12,5 ; 15 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 dan 75 A.

b. Rating keluaran (Output)

Rating ini menunjukkan daya transformator arus (dalam VA) yang digunakan untuk melayani beban pada sisi sekunder pada rating arus sekunder standard keluaran menurut standard IEC adalah : 2,5 ; 5 ; 10 ; 15 dan 30 VA.

c. Rating tingkat isolasi

Tingkat isolasi pada transformator arus dinyatakan dalam tegangan ketahanan impuls dan tegangan ketahanan frekwensi daya. Tegangan ketahanan impuls menunjukkan batas kemampuan isolasi transformator arus untuk menghadapi tegangan lebih yang mungkin terjadi, baik akibat sambaran kilat maupun proses switching. Tegangan ketahanan frekwensi daya menyatakan kemampuan isolasi transformator arus dalam menahan tegangan lebih frekwensi daya, misalnya pada

2.2.4.2. Transformator Tegangan

Transformator tegangan digunakan untuk menurunkan tegangan primer yang tinggi menjadi tegangan sekunder yang harganya tercapai oleh kemampuan peralatan ukur.

Pada transformator tegangan dikenal rating tegangan, rating keluaran dan rating tingkat isolasi.

a. Rating Tegangan

Rating tegangan primer transformator tegangan adalah sesuai dengan harga nominal tegangan sistem, sedangkan rating tegangan sekundernya ada beberapa standard ; negara-negara Eropa : 100 V ; 110 V ; 230 V.

Amerika Serikat dan Kanada : 120 V ; 115 V ; 230 V.

b. Rating Keluaran

Menurut standard IEC rating keluaran transformator, tegangan adalah 10 ; 15 ; 25 ; 30 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 200 ; 300 ; 400 ; dan 500 VA.

c. Rating Tingkat Isolasi

Seperti halnya pada transformator arus, rating tingkat isolasi transformator tegangan dinyatakan dalam tegangan ketahanan impuls dan ketahanan frekwensi daya.

2.2.5. Rel Daya

Dalam suatu gardu induk, rel daya mempunyai peranan yang sangat penting yaitu sebagai tempat untuk menggabungkan beberapa rangkaian saluran transmisi, baik saluran masuk maupun saluran keluar.

Ada beberapa besaran yang diperlukan dalam pemilihan rel daya yaitu tegangan sistem, arus normal dan kapasitas daya.

a). Tegangan sistem

Dalam menentukan rel daya ada dua macam tegangan yang harus diketahui yaitu tegangan nominal dan tegangan maksimum. Tegangan nominal dari suatu sistem adalah harga tegangan efektif fasa ke fasa, sedangkan tegangan maksimumnya ; berkisar 110% tegangan nominal. Konduktor rel daya dirancang untuk mampu menahan tegangan maksimum ini secara menerus tanpa menimbulkan gejala corona yang merugikan.

b). Arus normal

Arus normal pada rel yang daya adalah arus yang mampu dialirkan oleh rel daya terus menerus dengan kenaikan temperatur tidak melebihi yang diijinkan. Besarnya arus normal ini akan menentukan penampang konduktor yang digunakan pada rel daya.

c). Kapasitas daya

Kapasitas daya rel daya adalah daya terbesar yang mampu dialirkan oleh konduktor rel daya secara terus menerus dalam waktu yang lama.

2.2.6. Biaya Investasi Gardu Induk

Biaya investasi gardu adalah biaya yang dikeluarkan untuk pembangunan dan pembelian peralatan gardu induk. Biaya pembelian peralatan tergantung pada pemilihan peralatan yang diperlukan, dan ini sangat tergantung pada karakteristik peralatan. Dari uraian terdahulu mengenai karakteristik peralatan gardu induk tampak

bahwa besaran listrik yang sangat berperan adalah arus, tegangan dan daya baik transformator daya, peralatan penghubung, transformator ukur arrester maupun rel daya masing-masing mempunyai rating yang berkaitan dengan arus, tegangan dan daya. Pemilihan peralatan pasti berdasarkan pertimbangan biaya dan diusahakan mencari rating peralatan yang sesuai dengan kebutuhan sistem yang direncanakan.

Biaya pembangunan gardu induk meliputi biaya pembebasan tanah, penimbunan, pembangunan switch yard, gedung kontrol dan fasilitas penunjangnya. Secara umum dapat disusun suatu persamaan matematis yang menggambarkan hubungan linier antara biaya investasi dengan besaran-besaran tegangan daya dan arus sebagai berikut :

$$A = A_0 + A_1U + A_2P + A_3i \quad \text{Rp} \dots \dots \dots (2.3)$$

A_0 = Biaya tetap gardu induk

A_1 = Koefisien korelasi antara biaya gardu induk dengan tegangan sistem
(Rp/V)

A_2 = Koefisien korelasi antara biaya gardu Induk dengan daya sistem
(Rp./VA)

A_3 = Koefisien korelasi antara biaya gardu induk dengan arus sistem
(Rp.A).

2.2.7. Biaya Pengusahaan Gardu Induk

Biaya pengusahaan gardu induk adalah biaya yang dikeluarkan setiap tahun untuk keperluan operasi pemeliharaan gardu induk dan rugi rugi daya.

Operasi gardu induk meliputi supervisi, pencatatan, kontrol dan penyetelan kondisi operasi dari semua peralatan.

Pemeliharaan gardu induk meliputi patroli harian, perbaikan, inspeksi tetap dan inspeksi khusus. Patroli harian menyangkut pemeriksaan, pembersihan dan perbaikan sedang inspeksi tetap meliputi pemeriksaan dengan pembongkaran peralatan yang biasanya dilakukan setiap tahun. Inspeksi khusus dan perbaikan dilakukan bila kelihatan adanya ketidak normalan, atau gangguan yang serius pada peralatan. Tujuan dari pemeliharaan adalah menjamin operasi yang stabil dengan mencegah kemungkinan kegagalan operasi peralatan.

Rugi rugi daya yang terjadi pada gardu induk terutama pada transformator daya. Rugi rugi ini terdiri dari rugi rugi tembaga dan rugi rugi inti besi. Rugi rugi tembaga dan rugi rugi inti besi akan minimum pada keadaan beban penuh dan berkisar sekitar 2% dari daya nominal.

Secara total biaya perusahaan gardu induk pertahun dapat dibandingkan dengan biaya investasinya dan menurut penyelidikan Rene Pelisier besarnya 5% dari biaya investasi sehingga dengan metode nilai tunai maka biaya perusahaan dapat dijumlahkan dengan biaya investasi. Biaya total gardu induk menjadi :

$$A_T = A_0 + A_1U + A_2P + A_3i + (0,05) (A_0 + A_1P + A_3I) \\ (P/A, i\%, n)$$

$$A_T = A_{01} + A_{11}U + A_{21}p + A_{31}I \quad (Rp)$$

$$A_{01} = A_0 + (0,05) (P/A, i\%, n), A_0 \quad (Rp)$$

$$A_{11} = A_1 + (0,05) (P/A, i\%, n), A_1 \quad (Rp/V)$$

$$A_{21} = A_2 + (0,05) (P/A, i\%, n), A_2 \quad (Rp/VA)$$

$$A_{31} = A_3 + (0,05) (P/A, i\%, n), A_3 \quad (Rp/A)$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 11/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

BAB III

OPTIMASI TRANSMISI TEGANGAN TINGGI

Perencanaan transmisi tegangan tinggi berkaitan erat dengan masalah pemilihan luas penampang penghantar dan tegangan transmisi berdasarkan pertimbangan ekonomi dan teknis. Secara teknis, penggunaan penghantar yang kecil dibatasi oleh kemampuan penyaluran arusnya, pada sistem transmisi tegangan ekstra tinggi gejala corona harus ikut diperhitungkan, tetapi secara ekonomis penggunaan penghantar yang kecil jelas menghemat biaya investasi transmisi. Demikian pula dalam pemilihan tegangan transmisi, semakin tinggi tegangan berarti rugi-rugi daya berkurang tetapi biaya investasi transmisi semakin besar karena membutuhkan tingkat isolasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu diperlukan optimasi untuk menentukan luas penampang penghantar dan sistem tegangan yang tepat dengan menekan biaya transmisi serendah mungkin dan tetap memenuhi persyaratan teknis.

Optimasi dilakukan dengan mencari nilai minimum dari persamaan matematis biaya transmisi, yang secara simultan akan dihasilkan besaran-besaran luas penampang penghantar, tegangan arus dan impedansi ekonomi. Selanjutnya dari besaran ekonomis ini diteliti persyaratannya, yaitu kemampuan penyaluran arus dan persyaratan efek corona. jadi ada dua tahapan yang harus dilakukan untuk mencari besaran transmisi ekonomis dan pengecekan persyaratannya.

3.1. Perhitungan Biaya Transmisi Ekonomis

Biaya transmisi sistem tenaga listrik meliputi biaya untuk sistem penghantarnya dan sistem pengaturannya. Oleh karena itu dalam perhitungan biaya transmisi maka selain biaya untuk penghantar udara dimasukkan pula biaya gardu induk. Variasi biaya ini tergantung dari jarak transmisi. Secara total persamaan biaya transmisi adalah :

$$T = LD + A_T \dots \dots \dots (3.1)$$

$$T = \text{Biaya total transmisi} \quad (\text{Rp})$$

$$L = \text{Biaya penghantar udara perkilometer} \quad (\text{Rp / km})$$

$$D = \text{Jarak transmisi} \quad (\text{Km})$$

$$A_T = \text{Biaya gardu induk} \quad (\text{Rp})$$

Perhitungan biaya ini berdasarkan nilai tunai (Present worth).

Persamaan umum untuk L dan A (dari bab II) adalah :

$$L = L_0 + L_1U + L_2S + \frac{Jt}{S} I^2 \quad (\text{Rp / km})$$

$$A_T = A_{01} + A_{11}U + A_{21}P + A_{31}I \quad (\text{Rp / km})$$

Jadi persamaan (3,1) menjadi :

$$T = (L_0 + L_1U + L_2S + \frac{Jt}{S} I^2)D + (A_{01} + A_{11}U + A_{21}P + A_{31}I) \dots \dots \dots (3.2)$$

Dari persamaan di atas tampak bahwa harga A tidak tergantung pada S (luas penampang penghantar), sehingga penentuan S ekonomi dapat dilakukan secara terpisah dengan minimasi biaya penghantar udara, selanjutnya harga S ekonomi

dinaksudkan dalam persamaan umum biaya total transmisi, untuk menentukan U dan I ekonomis.

3.1.1. Luas Penampang Ekonomis

Persamaan umum biaya penghantar udara adalah :

$$L = L_0 + L_1 U + L_2 S + \frac{Jt}{S} I^2$$

Untuk menentukan harga S ekonomis, maka L dibuat minimum pada daya P konstan. jadi dibuat :

$$\frac{\gamma L}{\gamma U} = 0$$

$$\frac{\gamma L}{\gamma I} = 0$$

$$\frac{\gamma L}{\gamma S} = 0$$

Dengan syarat : $P = \sqrt{3 \cdot U I} = \text{kons tan} = K$

atau : $(\sqrt{3 U I} - K) = 0$

Untuk menyelesaikan persamaan ini, dipergunakan teorema La grange sehingga persamaan berubah menjadi :

$$\Psi = L + \lambda (P - K)$$

$$\varphi = L_0 + L_1 U + L_2 S + \frac{Jt}{S} I^2 + \lambda (\sqrt{3 U I} - K)$$

Syarat minimum :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial U} = 0 = L_1 + \lambda (I\sqrt{3})$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial I} = 0 = 2 \frac{J_t}{S} I + \lambda U\sqrt{3}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial S} = 0 = L_2 - \frac{J_t}{S^2} I^2$$

atau :

$$L_2 = \frac{J_t}{S^2} I^2$$

$$S_e = I_e \sqrt{\frac{J_t}{L_2}} \dots \dots \dots (3.3)$$

3.1.2. Tegangan dan Arus Ekonomis

Penentuan tegangan dan arus ekonomis berdasarkan minimisasi persamaan biaya total transmisi, dengan terlebih dahulu mengubah besaran S menjadi S ekonomis menurut persamaan (3.3). Jadi persamaan biaya total transmisi adalah :

$$T = (L_0 + L_1 U + L_2 I \sqrt{\frac{J_t}{L_2}} + J_t I^2 \frac{1}{I \sqrt{\frac{J_t}{L_2}}}) D + (A_{01} + A_{11} U + A_{21} P + A_{31} I)$$

$$T = (DL_0 + A_{01}) + (DL_1 + A_{11}) U + A_{21} U I \sqrt{3} + (2D\sqrt{L_2 J_t} + A_{31}) I.$$

Biaya transmisi T dibuat minimum suatu daya P konstan. Dengan adanya syarat P konstan, maka dipergunakan persamaan La Grange sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Psi &= T + \lambda (\sqrt{3}UI - K) \\ &= (DL_0 + A_{01}) + (DL_1 + A_{11})U + A_{21}UI\sqrt{3} + \\ &\quad (2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31})I + \lambda (\sqrt{3}UI - K)\end{aligned}$$

syarat minimum:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial U} = 0 = DL_1 + A_{21}I\sqrt{3} + \lambda I\sqrt{3}$$

atau:

$$I = \frac{-(DL_1 + A_{11})}{A_{21}\sqrt{3} + \lambda \sqrt{3}} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial I} = 0 = A_{21}U\sqrt{3} + (2D\sqrt{3} + (2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31}) + \lambda U\sqrt{3}$$

atau:

$$U = \frac{-(2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31})}{A_{21}\sqrt{3} + \lambda \sqrt{3}} \dots \dots \dots (3.5)$$

Dari persamaan (3.4) dan (3.5) maka :

$$\frac{I}{U} = \frac{(DL_1 + A_{11})}{(2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31})}$$

Sedang daya $P = \sqrt{3} UI$

$$P = \sqrt{3}U \cdot \frac{(DL_1 + A_{11})}{(2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31})} \cdot U$$

Jadi besar tegangan dan arus ekonomis adalah:

$$U_e = \sqrt{\frac{2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31}}{(DL_1 + A_{11})\sqrt{P}}} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{DL_1 + A_{11}}{(2D\sqrt{L_2Jt} + A_{31})\sqrt{3}}} \cdot \sqrt{P} \dots \dots \dots (3.7)$$

3.1.3. Impedensi Ekonomis Transmisi

Impedansi ekonomis adalah impedansi transmisi pada keadaan tegangan dan arus ekonomis.

$$Z_e = \frac{U_e}{\sqrt{3}I_e} = 2D \frac{\sqrt{L_2 J t} + A_{31}}{(DL_1 + A_{11})\sqrt{3}} \dots\dots\dots(3.8)$$

$$U_e = Z_e P \dots\dots\dots(3.9)$$

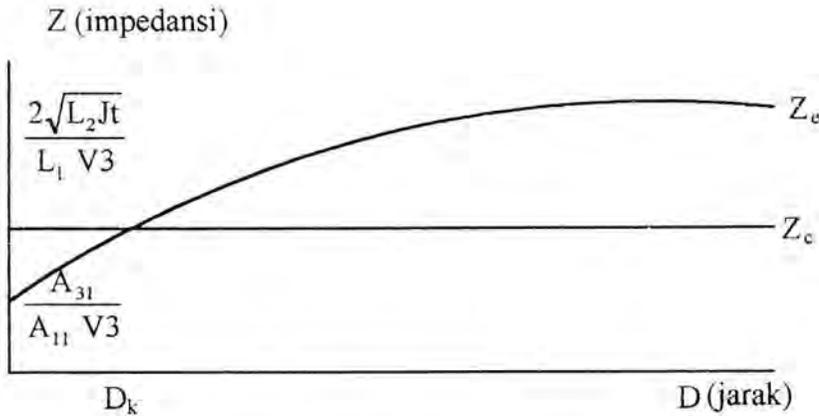
Dari persamaan di atas nampak bahwa Impedansi ekonomis besarnya tidak tergantung tegangan dan mempunyai dimensi impedansi sehingga dapat dibandingkan dengan impedansi karakteristik transmisi untuk menentukan batasan pembebanan transmisi. Harga Z_c (Z karakteristik) hanya tergantung pada konfigurasi sehingga pada tegangan tertentu Z_c konstan.

Variasi Z_e sebagai fungsi jarak D dilukiskan pada gambar 3.1. dengan titik minimum dan maksimum adalah :

$$Z_{e \text{ min}} = \frac{A_{31}}{A_{11}\sqrt{3}}, \text{ yaitu } Z_e \text{ pada } D = 0$$

$$Z_{e \text{ Max}} = \frac{2\sqrt{L_2 J t}}{L_1\sqrt{3}}, \text{ yaitu } Z_e \text{ pada } D \rightarrow$$

Z (impedansi)



Gambar 3.1. Grafik $Z_e = f(D)$ dan $Z_c = f(D)$

Dari grafik tersebut tampak bahwa :

- Pada jarak $D < D_k$ (D_{kritis}) impedansi ekonomis lebih kecil dari pada impedansi karakteristik, sehingga pada batasan jarak tersebut pengiriman daya akan lebih ekonomis bila lebih besar dari daya natural saluran transmisi.
- Pada jarak $D > D_k$, impedansi ekonomis lebih besar dari pada impedansi karakteristik. Jadi daya ekonomis lebih kecil dari daya natural transmisi. Hal ini kurang menguntungkan karena kapasitas daya transmisi tidak dapat dimanfaatkan secara penuh.

Jadi secara ekonomis pengiriman daya pada tingkat daya naturalnya akan dibatasi oleh jarak kritis D_k , dan untuk daya yang lain jarak kritisnya akan berlainan.

3.1.4. Impedansi karateristik transmisi

Impedansi karateristik transmisi adalah impedansi dari sistem transmisi yang berkaitan dengan parameter-parameter resistansi , kapasitas, induktansi dan konduktansi bocor transmisi.

Rumus umum impedansi karateristik adalah :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L'}{G + j\omega C}} \dots\dots\dots(3.10)$$

Z_c = Impedansi karateristik transmisi (Ω)

R = Resistansi per-satuan panjang (Ω/m)

L' = Induktansi persatuan panjang (H/m)

G = Konduktansi bocor per satuan panjang (v/m)

C = Kapasintansi per satuan panjang (F/m)

$$\omega = \frac{1}{2 \pi F}$$

Impedansi karateristik biasanya dipergunakan untuk menentukan daya natural dari transmisi, yaitu daya pada keadaan transmisi dibebani sebesar impedansi karateristiknya-karateristiknya untuk hantaran tanpa rugi-rugi, harga R dan G adalah nol sehingga persamaan (3.10) berubah menjadi :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C}} \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots\dots(3.11)$$

Pada keadaan ini impedansi karakteristik bersifat resistif murni, sehingga arus dan tegangan akan sefase sepanjang hantaran. daya natural dalam keadaan ini adalah :

$$P_n = \frac{V^2}{\sqrt{\frac{L'}{C}}} \quad (W) \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

Secara praktis, pembebasan transmisi sering dinyatakan dalam perbandingan dengan daya naturalnya.

Untuk menentukan impedansi karakteristik maupun daya natural transmisi menurut persamaan (3.11) dan (3.12), maka terlebih dahulu dicari induktansi dan kapasitas dari transmisi.

3.1.4.1. Induktansi Saluran Transmisi

Susunan penghantar pada sistem transmisi tiga fase umumnya tidak simetris, sehingga induktansi fasenya tidak sama untuk masing-masing penghantar, oleh karena itu dalam perhitungan induktansi dianggap bahwa penghantar masing-masing fase ditransposisikan sehingga di dapat induktansi rata-rata yang sama untuk masing-masing penghantar.

Rumus umum induktansi perfase dari saluran sirkuit tunggal yang ditransposisikan adalah :

$$L' = 2 \times 10^{-7} \quad \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad (H/m) \dots\dots\dots(3.13)$$

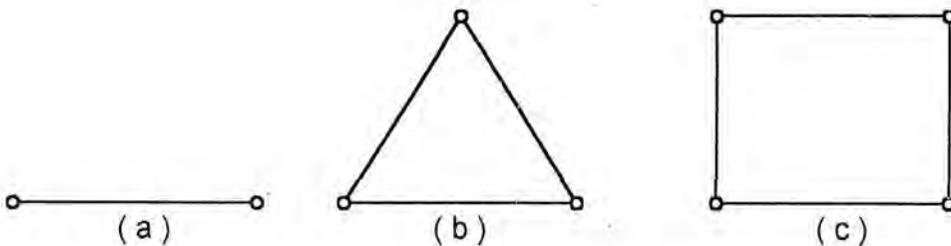
D_{eq} = Geometric mean distance (GMD)
 $= 3\sqrt{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots\dots\dots(3.14)$

D_s = Geometric mean radius (GMR)
 $= \frac{d}{2} e^{-\frac{1}{4}}$ untuk konduktor tunggal $\dots\dots\dots(3.15)$



Gambar 3.2. Siklus transposisi penghantar sirkuit tunggal

Dengan mengetahui konfigurasi penghantar dimenara transmisi dan jenis penghantar yang dipergunakan, maka dapat dihitung besar induktansi perfase saluran transmisi.



Gambar 3-3. Beberapa macam konfigurasi konduktor dalam penghantar berkas.

3.1.4.2. Kapasitas Saluran Transmisi

Dalam perhitungan kapasitas saluran transmisi, seperti halnya perhitungan induktansi, dianggap bahwa penghantar fase ditransposisikan, sehingga kapasitas rata-rata ke tanah untuk masing-masing fase ke tanah akan sama.

Rumus kapasitansi fase ke tanah dari saluran transmisi sirkuit tunggal adalah

$$C_n = \frac{2\pi K'}{D_{eq} / D_s} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$K' = \text{Permitifitas medium (F / m)} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$D_s = \frac{d}{2} \dots\dots\dots(3.18)$$

Dari persamaan tersebut tampak adanya kesamaan perhitungan D_{eq} dan D_s dari rumus induktansi, perbedaannya adalah pada harga D_s untuk perhitungan kapasitansi $D_s = \frac{d}{2}$ = jari-jari penghantar, sedang untuk perhitungan induktansi

$D_s = \left(\frac{d}{2}\right) e^{\frac{-1}{4}}$. Jadi persamaan-persamaan I_{eq} dan D_s dari perhitungan saluran

dapat dipergunakan dalam perhitungan kapasitansi, tetapi dengan mengubah GMR konduktor menjadi jari-jari konduktor.

3.1.5. Tegangan dan Daya Batas

Penyelidikan selanjutnya dilakukan untuk menentukan tegangan antara dari dua tingkat tegangan ekonomis yang berbeda cukup, dan daya batas pada keadaan tersebut.

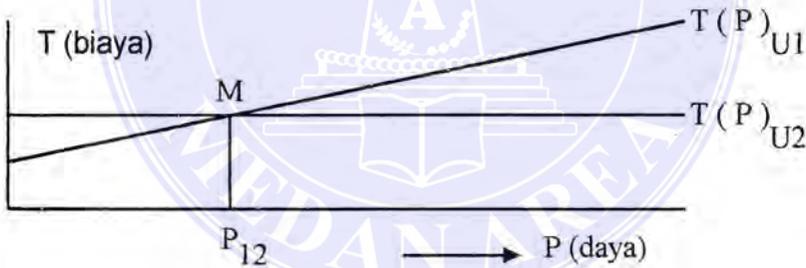
Biaya transmisi dengan harga yang tidak tergantung U yang telah dipisahkan adalah :

$$T = (DL_0 + A_{01}) + A_{21}P + (DL_1 + A_{11})(U + Z_e P / U) \dots\dots\dots(3.19)$$

dari persamaan (3.8).

$$Z_e = \frac{2D\sqrt{L_2 Jt} + A_{31}}{(DL_1 + A_{11})\sqrt{3}} \quad (\Omega)$$

Jadi pada suatu tegangan dan jarak transmisi tertentu biaya transmisi T hanya tergantung pada daya P bila terdapat dua tingkat tegangan U_1 dan U_2 , dengan $U_1 < U_2$ maka grafik $T = f(P)$ pada kedua tingkat tegangan tersebut adalah seperti berikut :



Gambar 3-4. Grafik $T = f(P)$ untuk tegangan $U_1 < U_2$ dan jarak transmisi tertentu.

Dari grafik tersebut tampak bahwa pada daya $P < P_{12}$ maka tegangan ekonominya adalah U_2 . pada titik M biaya transmisi untuk kedua tingkat tegangan tersebut sama, sehingga dari persamaan (3.19) di dapat

$$U_1 + Z_e P_{12} / U_1 = U_2 + Z_e P_{12} / U_2$$

$$Z_e P_{12} (1/U_1 - 1/U_2) = U_2 - U_1$$

$$Z_e P_{12} = U_1 U_2$$

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{Z_e} = \frac{U_{12}^2}{Z_e} \dots \dots \dots (3.20)$$

$$U_{12} = \sqrt{U_1 U_2} \dots \dots \dots (3.21)$$

Jadi pada daya P_{12} tegangan ekonomisnya adalah U_{12} . Daya P_{12} merupakan daya batas antara daerah daya $P < P_{12}$ untuk tegangan U_{12} dan daerah daya $P > P_{12}$ untuk tegangan U_2 .

3.16. Penentuan Grafik Daya Sebagai Fungsi Jarak Transmisi

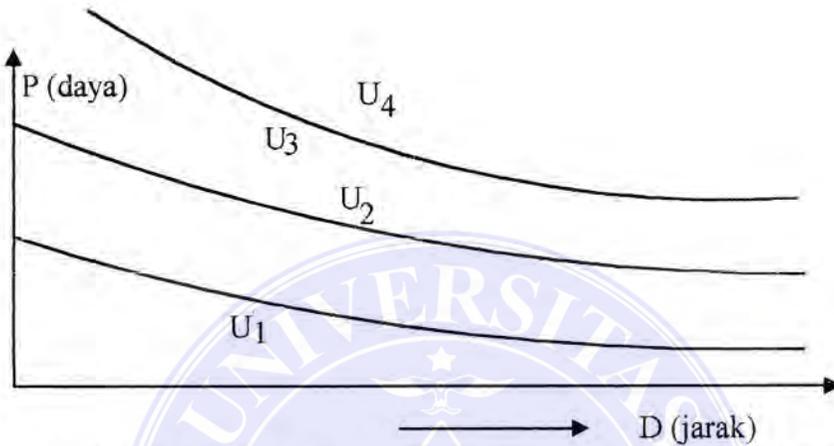
Hasil perhitungan tegangan dan daya batas dapat dikembangkan untuk jarak-jarak transmisi yang lain. Jadi dalam hal ini dapat dibuat suatu grafik $P_{12} = f(D)$ untuk menentukan daya batas antara daerah daya $P < P_{12}$ pada tegangan U_1 dan daerah daya $P > P_{12}$ untuk tegangan U_2

Bila terdapat beberapa tingkat tegangan transmisi : U_1, U_2, U_3 dan U_4 maka daya batasnya adalah P_{12}, P_{23} dan P_{34} sesuai dengan persamaan (3.20) maka besar daya batas masing-masing adalah :

$$P_{12} = \frac{U_{12}^2}{Z_e} ; P_{23} = \frac{U_{23}^2}{Z_e} ; P_{34} = \frac{U_{34}^2}{Z_e}$$

$$U_{12} = \sqrt{U_1 U_2} ; U_{23} = \sqrt{U_2 U_3} ; U_{34} = \sqrt{U_3 U_4}$$

$$Z_c = \frac{2D\sqrt{L_2 J t + A_{31}}}{(DL + A_{11}) \sqrt{3}}$$

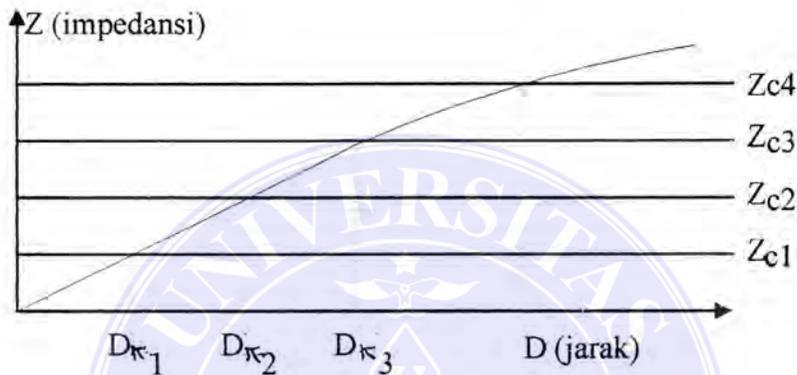


Gambar 3.5. Grafik $P = f(D)$ untuk tegangan transmisi U_1, U_2, U_3 dan U_4

Dari grafik tersebut tampak bahwa daerah daya untuk tegangan U_1, U_2, U_3 dan U_4 berturut-turut adalah : $P < P_{12} < P < P_{23} < P < P_{34} ; P < P_{34}$.

Pengiriman daya secara ekonomis pada tingkat daya naturalnya akan dibatasi oleh jarak kritisnya, jarak kritis dapat ditentukan dengan mencari titik potong antara impedansi karakteristik dengan impedansi ekonomis transmisi. Untuk beberapa macam tingkat tegangan akan mempunyai daya natural yang berlainan dan tergantung pada impedansi karakteristiknya, oleh karena itu pengiriman daya pada tingkat daya natural ini akan dibatasi oleh jarak kritis masing-masing.

Untuk tegangan transmisi U_1 , U_0 , U_3 , dan U_4 dengan impedansi karakteristik Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3} , dan Z_{c4} mempunyai titik potong dengan impedansi ekonomis Z_c pada jarak kritis D_{k1} , D_{k2} , D_{k3} dan D_{k4} .



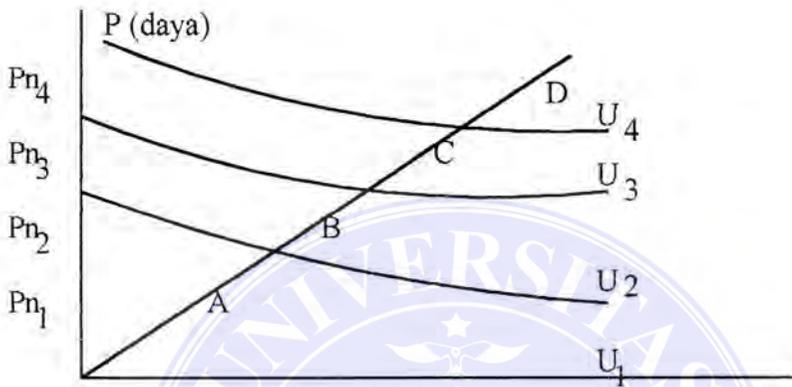
Gambar 3.6. Jarak kritis D_{k1} , D_{k2} , D_{k3} dan D_{k4} untuk impedansi karakteristik Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3} dan Z_{c4} .

Jarak-jarak kritis untuk daya P_{n1} , P_{n2} , P_{n3} dan P_{n4} dapat dilukiskan dalam gambar (3.6) (titik A,B,C, dan D) sebagai batasan jarak maksimum pada tingkat daya tersebut daya P_n adalah daya natural pada tingkat tegangan dan besarnya adalah :

$$P_n = \frac{U^2}{Z_c}$$

Jarak kritis untuk daya $P > P_n$ akan lebih besar dari pada jarak kritis pada P_n , karena pengiriman daya pada tingkat daya di atas P_n lebih ekonomis, sebaliknya untuk $P < P_n$ jarak kritisnya akan lebih pendek, oleh karena itu penentuan jarak

kritis untuk tingkat-tingkat daya yang lain dilakukan dengan membuat interpolansi dari titik-titik koordinat A,B,C dan D (Gambar 3.7).



Gambar 3.7. Batas-batas daerah daya ekonomis untuk beberapa tingkat tegangan transmisi.

Grafik pada gambar 3.7 dapat dipergunakan untuk menentukan tegangan transmisi yang tepat pada suatu daya dan jarak transmisi tertentu, atau untuk menentukan jarak transmisi maksimum pada suatu daya dan tegangan transmisi tertentu.

3.1.7. Penentuan Luas Penampang Penghantar Ekonomis

Luas penampang penghantar ekonomis dapat ditentukan dari persamaan

(3.3) yaitu :

$$S_e = I_e \sqrt{\frac{Jt}{L_2}} \quad (\text{mm}^2)$$

Sedangkan,

$$I_e = \sqrt{\frac{P}{3Z_e}} \quad (A)$$

maka : $S_e = \sqrt{\frac{P Jt}{3 \cdot Z_e \cdot L_2}} \quad (\text{mm}^2), \dots \dots \dots (3.22)$

Jadi luas penampang penghantar ekonomis dapat ditentukan bila daya P dan impedansi ekonomis Z_e sudah diketahui. Harga Z_e hanya tergantung pada jarak transmisi dan dapat diketahui dari grafik (3.1) sehingga pada suatu perencanaan sistem transmisi yang jarak dan dayanya sudah ditentukan maka luas penampang penghantar ekonomis dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (3.22).

3.2. Persyaratan Teknis Penghantar

Beberapa persyaratan teknis untuk penghantar adalah kemampuannya untuk menyalurkan arus batasan interferensi radio yang mungkin terjadi akibat gejala corona. Kemampuan penyaluran arus penghantar ditentukan berdasarkan pemanasan maksimum yang boleh terjadi pada penghantar, sedangkan batasan gangguan radio akibat ditentukan dengan ukuran SNR (Signal to Noise Ratio) yang diizinkan.

3.2.1. Kemampuan Penyaluran Arus Penghantar

Kenaikan temperatur penghantar akibat pemanasan rugi-rugi harus dibatasi untuk mencegah pemanasan penghantar yang berlebihan, yang mengakibatkan pertambahan andongan dan mempengaruhi kekuatan tarik penghantar.

Perhitungan kapasitas penyaluran arus penghantar berdasarkan persamaan keseimbangan panas, dan secara empiris diturunkan oleh schurig dan frich sebagai berikut :

$$I^2R + S'd = H_c + S_s [(\theta + t273)^4 - (t + 273)^4] d (W / cm)$$

dan,

$$H_c = 13,8 \times 10^{-4} \times (Vxd)^{0,448} \theta (W / cm)$$

Keterangan :

I = Arus Penghantar (A)

R = Tahanan AC pada temperatur kerja (Ω/cm)

α = Koefisien penyerapan panas matahari = 1 untuk warna hitam

S' = Intensitas radiasi matahari (w/cm²)

d = Diameter penghantar (cm)

H_c = Rugi-rugi konveksi (w/cm)

t = Pemancar (emisi) penghantar

= 1 untuk warna hitam

V = Kecepatan angin (cm/dt)

s = Konstanta stefan ($=5,7 \times 10^{-12} \text{ w/xm}$)

θ = Kenaikan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

t = Temperatur lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

3.2.2. Interferensi Radio

Pada transmisi tegangan ekstra tinggi terjadi peristiwa pelepasan muatan (corona) pada penghantar, yang mengakibatkan gangguan gelombang radio. Tingkat gangguan yang ditimbulkan tergantung pada kuat medan listrik pada permukaan penghantar, penampang penghantar dan jumlah konduktor pada penghantar berkas serta geometri menara. Besar kuat medan listrik pada permukaan penghantar adalah :

$$E = \frac{U}{\sqrt{3}} \frac{1}{r} \left(\frac{P}{r_2} \frac{2n'}{4h'^2 + p^2} \right) \quad (\text{Kv/cm})$$

$$= \frac{1 + (n-1) \frac{r}{R}}{n}$$

$$r_e = R' \quad n \frac{nr}{R} \quad (\text{cm})$$

$$R' = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{R}} \quad (\text{cm})$$

$$E_r = E \times \frac{l}{l + 2,12 \frac{d}{a}} \quad (\text{Kv/cm})$$

E = Kuat medan listrik permukaan penghantar (Kv/cm)

U = Tegangan kerja

= Faktro untuk penghantar berkas

r = Jari-jari konduktor (cm)

R' = Jari-jari luar penghantar berkas (cm)

r_e = Jari-jari ekivalen penghantar berkas (cm)

a = Jarak antar pusat konduktor (cm)

p = Jarak antar phasa (cm)

h' = Tinggi penghantar dari tanah (cm)

n = Jumlah konduktor dalam penghantar berkas

E_r = Kuat medan listrik rata-rata (kv/cm)

d = Diameter konduktor (cm)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Pemilihan tegangan transmisi tergantung pada dasar daya yang akan disalurkan dan jarak transmisi, semakin besar daya dan jarak maka dibutuhkan tegangan transmisi lebih tinggi untuk mengurangi rugi rugi daya.
2. Penentuan tegangan transmisi ekonomis umumnya menghasilkan harga yang berbeda dengan tegangan standar yang ada.

Perbedaan ini menimbulkan perbedaan biaya transmisi diantara keduanya semakin kecil perbedaan tegangan standard terhadap tegangan ekonomis pada suatu daya dan jarak transmisi tertentu maka selisih biaya transmisi diantara keduanya semakin kecil pula.

3. Perhitungan luas penampang penghantar ekonomis dapat dihitung bila sudah diketahui besar daya dan jarak transmisi, jarak transmisi menentukan impedensi ekonomis Z_e dan bila Z_e sudah diketahui maka S_e dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.22)
4. Untuk menentukan luas penampang penghantar yang secara ekonomis memenuhi persyaratan dapat dipergunakan persamaan (3.22) yaitu :

$$S_e = \sqrt{\frac{P \cdot J_t}{3Z_e \cdot L_2}} \quad (\text{mm}^2)$$

5.2. Saran-saran

1. Perhitungan biaya transmisi berdasarkan konstanta-konstanta ekonomis yang telah di dapat dipergunakan sebagai patokan umum untuk memperkirakan biaya inestasi maupun biaya perusahaan sistem transmisi yang ekonomis di Sumatera Utara.
2. Sedangkan persyaratan teknisnya dapat ditinjau dengan melihat kemampuannya menyalurkan arus dan batasan Interprensi Radio. Pemilihan luas penampang penghantar dengan persamaan tersebut sudah memasukkan pengaruh biaya rugi rugi saluran udara yaitu pada harga J_t , sedangkan L_2 menunjukkan korelasi dari biaya investasi saluran udara yang berkaitan dengan luas penampang penghantar, umumnya pemilihan luas penampang penghantar di dasarkan pada kemampuannya menyalurkan arus serta memenuhi persyaratan interfrensi radio, sehingga diusahakan penggunaan penghantar sekecil mungkin dengan berpegang pada persyaratan teknis tersebut, yang tujuannya untuk mendapatkan biaya investasi serendah mungkin.

Jadi dengan kedua dasar perhitungan tersebut, maka terdapat kemungkinan bahwa penggunaan penghantar yang luas penampangnya secara teknis memenuhi syarat tetapi secara ekonomis masih kurang besar, karena belum

memperhitungkan pengaruh biaya rugi-rugi saluran udara selama penggunaannya.



DAFTAR PUSTAKA

1. Bambang Sumektor, Studi Optimasi Transmisi.
2. Kalkulus Perubahan Banyak, Penerbit ITB 1979.
3. Artono Arismunandar , Teknik Tenaga Listrik, 1976,1973.
4. Stevenson, Wiliam D, Analisis of Power Sistem.
5. Merz And Mekllan, Java 500 kv Transmision Sys, Engineer Report PLN,1979.
6. MC. Graw Hill, 1975, Elektrik Transmision and Distribusion Reference Book .
7. Westing House Electrical Corporation , East Phatsbur, 1950.