

OPTIMASI PELETAKAN ARESTER PADA SALURAN DISTRIBUSI KABEL CABANG TUNGGAL AKIBAT SURJA PETIR GELOMBANG PENUH

Yuni Rahmawati, ST*

Abstrak: Untuk menganalisis besar tegangan maksimum yang terjadi pada jaringan distribusi kabel cabang tunggal, yang diakibatkan oleh adanya gelombang berjalan yang berupa gelombang surja petir pada titik-titik peralihan. Pada titik peralihan lebih memungkinkan terjadinya tegangan maksimum, karena adanya diskontinuitas yang akan mengakibatkan pantulan atau terusan pada titik, sehingga dapat terjadi pemantulan gelombang berjalan yang datang. Gelombang surja petir merupakan salah satu penyebab penuaan kabel yang mengakibatkan turunnya BIL kabel. Agar sistem proteksi tetap terjaga dengan baik penting untuk mempertahankan level proteksi surja kabel di bawah penurunan BIL kabel yang terjadi. Untuk mencari letak dan besar tegangan maksimum pada jaringan menggunakan metode diagram tangga (*bounce diagram*), dengan memvariasi model dari jaringan kabel tunggal, yaitu dengan mengubah letak dan panjang cabang saluran. Dengan variasi peletakan dan panjang cabang saluran distribusi kabel cabang tunggal didapat hasil tegangan surja petir maksimum terletak pada ujung cabang terpendek dari saluran untuk kasus gelombang terpotong muka. Dan untuk kasus gelombang penuh tegangan surja petir maksimum terletak pada titik ujung saluran terpendek bila panjang saluran sebelum percabangan lebih kecil dari panjang cabangnya. Untuk kondisi sebaliknya tegangan surja maksimum terletak pada titik ujung cabang terpanjang. Pemasangan arester sebagai pengamanan surja harus memperhatikan hal-hal berikut: (1) tegangan sistem; (2) tegangan dasar; (3) tegangan pelepasan arester; (4) nilai gelombang petir.

Kata-kata kunci: Tegangan maksimum, jaringan distribusi, gelombang berjalan, surja petir.

Sambaran petir yang tidak langsung mengenai suatu peralatan tetapi mengenai peralatan lain kemudian masuk ke peralatan melalui proses induksi atau imbas akan menimbulkan surja tegangan atau surja arus. Surja petir ini menjadi penyebab kerusakan kabel distribusi bawah tanah terutama pada proses penuaan dini dari kabel distribusi bawah tanah ini. Apabila kabel ini dibebani kerusakan fisis akibat gangguan fisis yang lain maka akan mempercepat proses penuaan kabel. Dalam kasus ini *Basic Insulation Level* (BIL) dari kabel bisa turun secara drastis. Penurunan BIL kabel ini akan mengakibatkan kerusakan pada sistem distribusi apabila penurunan ini tidak disertai oleh koordinasi isolasi dengan level proteksi surja petir kabel. Harus diusahakan untuk mempertahankan level proteksi kabel (BIL kabel) di bawah level penurunan BIL kabel

yang terjadi. Penting juga untuk mengurangi puncak tegangan impuls yang mengenai kabel baru guna mengurangi jumlah kerusakan yang diakibatkan oleh surja petir.

Tegangan puncak ini berada pada titik-titik di sepanjang saluran kabel distribusi. Utamanya pada titik-titik yang mengalami kondisi diskontinuitas. Yaitu pada titik peralihan, percabangan ataupun titik akhir yang terbuka (*open tie*). Karena pada titik-titik ini terjadi pemantulan maupun penerusan gelombang, sehingga kemungkinan terjadinya penumpukan gelombang, yang memungkinkan terjadinya tegangan maksimal lebih besar pada titik-titik tersebut. Pengurangan tegangan puncak ini dapat diatasi dengan menempatkan suatu alat proteksi yaitu arrester pada titik-titik pada saluran distribusi untuk menentukan sistem

*Yuni Rahmawati adalah Dosen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang

karena itu penting sekali untuk mengetahui lokasi tegangan maksimum dan besar tegangan maksimum pada suatu saluran distribusi untuk menentukan sistem proteksi yang tepat pada saluran distribusi tersebut.

Dalam hal ini diambil kasus pada saluran distribusi kabel bercabang tunggal karena saluran cabang tunggal merupakan dasar dari saluran bercabang banyak, sebagai gambaran perkembangan permintaan daya listrik yang selalu berkembang tiap tahunnya. Dan pada makalah ini akan dibahas di mana dan berapa besar tegangan surja petir maksimum pada kondisi proteksi tertentu, bila konfigurasi letak dan panjang cabang diubah-ubah. Setelah diketahui letak dan besar tegangan maksimum dapat ditentukan sistem proteksi yang baru.

GELOMBANG BERJALAN

Sumber-sumber Gelombang Berjalan

Dalam keadaan operasinya, sistem tenaga sering mengalami gangguan yang mengakibatkan terhentinya pelayanan daya. Gangguan ini lebih sering terjadi pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik dan biasanya disebabkan oleh naiknya tegangan pada hantaran. Yaitu jika suatu sambaran petir mengenai konduktor tersebut akan naik mencapai harga yang sama dengan hasil kali arus petir dengan harga impedansi surja hantaran yang tersambar. Kasus inilah yang dikenal dengan tegangan lebih.

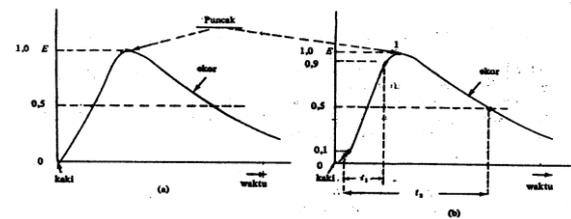
Karakteristik dari tegangan menyerupai bentuk gelombang yang berjalan di sepanjang hantaran yang dilaluinya. Bila tegangan melampaui tingkat ketahanan isolasi dari hantaran atau peralatan listrik lainnya, maka akan terjadi gangguan pemburukan isolasi peralatan yang dapat menyebabkan hantaran ataupun peralatan itu terbakar.

Salah satu sebab yang dapat menimbulkan gelombang berjalan adalah sambaran petir secara induksi, yaitu sambaran yang tidak mengenai langsung

pada suatu peralatan tetapi masuk ke suatu peralatan secara tiba-tiba pada suatu hantaran atau suatu peralatan. Energi listrik ini merambat seperti halnya bila kita melemparkan batu pada air yang tenang dalam sebuah kolam. Energi yang merambat ini berupa gelombang arus dan tegangan. Sedangkan sampai saat ini yang diketahui menjadi penyebab gelombang berjalan adalah (Hutahuruk, 1991: 1): Sambaran kilat secara langsung, Sambaran kilat secara tidak langsung, Operasi pemutusan (*switching operation*), Busur tanah (*arching grounds*), Gangguan-gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan.

Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Berjalan

Bentuk umum suatu gelombang berjalan digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Berjalan (Sumber: Hutahuruk, 1991: 4)

Spesifikasi dari suatu gelombang berjalan:

1. Puncak (*crest*) gelombang, E (kV), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
2. Muka gelombang, t_1 (mikro detik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Dalam praktek ini diambil dari 10% E sampai 90% E , seperti terlihat pada gambar 2.1 b.
3. Ekor gelombang, yaitu bagian dibelakang puncak. Panjang gelombang, t_2 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
4. Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negatif.

Suatu gelombang berjalan dinyatakan sebagai: $E, t_1 \times t_2$

dimana; t_1 = muka gelombang (μ detik)
 t_2 = ekor gelombang (μ detik)

Kecepatan Merambat Gelombang Berjalan

Kecepatan merambat gelombang berjalan pada saluran dapat dirumuskan sebagai berikut (Westing House, 1950: 525) :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Untuk kecepatan merambat gelombang berjalan pada kawat udara dengan jari-jari r dan tinggi h dari atas tanah, maka kita dapat menghitung: (Hutahuruk, 1991: 4)

$$L = 2 (\ln(2h/r)). 10^{-9} \text{ H/cm}$$

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln(2h/r)} \text{ F/cm}$$

Dengan memasukkan nilai nilai tersebut pada persamaan (1) maka kita bisa mengetahui besar kecepatan gelombang pada kawat udara:

$$v = \sqrt{\frac{18 \ln(2h/r).10^{11}}{2 \ln(2h/r).10^{-9}}} \quad (2)$$

$$v = 3 \times 10^{10} \text{ cm/detik}$$

Jadi, kecepatan gelombang berjalan pada kawat udara sama nilainya dengan kecepatan udara yaitu 3×10^8 m/ detik dengan:

V = kecepatan perambatan gelombang, L = induktansi saluran, C = kapasitas saluran

Impedansi Surja

Impedansi surja mempunyai nilai sebagai berikut (Hutahuruk 1991: 4):

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Untuk hantaran udara besar impedansi surja adalah:

$$z = \sqrt{L/C}$$

$$z = \sqrt{L/C} = \sqrt{\frac{2 \ln(R/r)}{10^{-11}}} = 60 \ln 2h/r \quad (3)$$

dengan:

R = jari-jari isolasi pembungkus, r = besar jari-jari konduktor padat.

Besar impedansi surja untuk kawat udara = 400- 600 ohm.

Pengaruh Titik Peralihan dalam Saluran Terhadap Gelombang Berjalan

Apabila gelombang berjalan menemui titik peralihan dalam perambatannya di saluran, misalkan karena hubung terbuka, hubung singkat ataupun perubahan impedansi maka kondisi yang akan terjadi adalah sebagian dari gelombang itu akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan ke bagian lain dari saluran tersebut.

Gelombang yang datang dinamakan gelombang datang atau *incident wave* dan gelombang yang timbul karena titik peralihan yang arahnya berlawanan dengan gelombang datang dinamakan gelombang pantul atau *reflected wave* sedangkan gelombang yang diteruskan setelah menemui titik peralihan dinamakan gelombang terusan atau disebut *transmitted wave*.

DIAGRAM TANGGA

Dalam banyak persoalan penting yang berhubungan dengan gelombang berjalan, perlu diperhatikan pantulan berulang dari gelombang berjalan. Peristiwa ini terjadi ketika gelombang berjalan merambat melalui hantaran yang mempunyai impedansi surja yang berbeda-beda atau mengalami titik peralihan pada saluran yang dirambatinya. Misalkan pada peristiwa saluran distribusi udara beralih ke saluran distribusi bawah tanah.

Untuk keperluan studi sistem proteksi terhadap surja petir pada jaringan distribusi bawah tanah yang disatu hantaran udara, transformator di ujung akhir kabel diasumsikan sebagai saluran terbuka. Hal ini untuk mensimulasikan keadaan yang paling berbahaya yang mungkin diderita oleh transformator, dimana gelombang surja yang datang pada terminalnya akan menjadi 2 kali lipatnya.

Gelombang datang ini akan dipantulkan kembali dan merambat

sepanjang kabel menuju titik peralihan (titik sambung antara hantaran udara dengan kabel), terjadi penerusan gelombang ke hantaran udara dan pantulan gelombang ke kabel menuju titik terbuka. Di titik terbuka gelombang surja menjadi ganda dan dipantulkan kembali ke kabel, demikian seterusnya yang akan menimbulkan pantulan berulang. Karena gelombang berjalan tergantung pada waktu, maka superposisi gelombang datang dan pantul akan semakin besar. Adanya pantulan berulang ini selain dapat merusak isolasi kabel juga transformatornya. Untuk itu diperlukan alat pelindung yang dapat melindungi peralatan dari kerusakan karena gelombang surja, terutama kerusakan akibat proses pantulan berulang.

Metode Diagram Tangga

Untuk menentukan Diagram Tangga, maka langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

- Letakkan titik-titik sambungan menurut skala yang sesuai dengan waktu yang dibutuhkan untuk melalui tiap seksi.
- Pilihlah skala waktu vertikal sebelah kiri dari diagram itu.
- Lukislah jalannya gelombang itu secara diagonal.

Keuntungan dari pemilihan panjang seksi yang disesuaikan dengan waktu yang diperlukan oleh gelombang seksi itu adalah semua diagonal mempunyai kemiringan (*slope*) yang sama.

Dari diagram itu dapat dilihat:

- Semua gelombang menurun dalam perambatannya.
- Posisi dari suatu gelombang pada saat tertentu diberikan oleh skala waktu vertikal.
- Jumlah tegangan pada tiap titik pada waktu tertentu ialah superposisi dari semua gelombang yang telah sampai pada titik itu pada saat tersebut.
- Asal mula tiap gelombang dapat dicari dengan mudah yaitu dari mana

datangnya dan gelombang mana yang berkomposisi dengannya.

- Dengan diikutsertakannya redaman dapat dihitung berapa turunnya gelombang dalam perambatannya di tiap seksi.

PEMILIHAN ARESTER

Tegangan sistem

Tegangan tertinggi yang mungkin timbul pada kawat pada waktu terjadi gangguan kawat ke tanah. Tegangan tertinggi ini tergantung juga pada metode pengetanahan sistem. Beberapa metode pengetanahan yang sering digunakan adalah sebagai berikut (Hutahuruk, 1991: 105):

- Sistem yang tidak diketanahkan atau sistem terisolasi
Pada sistem yang tidak diketanahkan atau sistem terisolasi, tegangan yang mungkin timbul pada arrester dapat lebih besar dari tegangan jala-jala. Tegangan maksimum untuk pemakaian arrester diambil 105-110% dari tegangan jala-jala, jadi ada penambahan sekitar 5-10%. Alat proteksi seperti ini dinamakan arrester 100%.
- Sistem yang diketanahkan melalui kumparan Peterson
Tegangan maksimum pada gangguan tanah sama dengan tegangan jala-jala, maka untuk sistem ini lebih baik menggunakan arrester 100%.
- Sistem yang diketanahkan dengan Impedensi
Pada sistem ini dibagi menjadi dua, yaitu:
 - Sistem yang diketanahkan efektif, yaitu suatu sistem yang pada waktu terjadi gangguan ke tanah melampaui 80 % tegangan jala-jala.
 - Sistem yang diketanahkan tidak efektif, yaitu bila tegangan pada fase sehat dalam keadaan gangguan ke tanah lebih besar dari 80 % tapi kurang dari 100 %.

Tegangan Dasar

Tegangan dasar arrester ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi ditambah dengan suatu toleransi yang dapat dirumuskan sebagai berikut (Arismunandar, 1990):

$$E_r = \alpha \beta U_m \quad (4)$$

Dimana: E_r = tegangan dasar arrester

α = koefisien pembumian

β = toleransi (fluktuasi tegangan, efek feranti)

U_m = tegangan sistem maksimum

Koefisien pembumian (α) menunjukkan kenaikan pada fasa sehat pada waktu terjadi gangguan satu fasa ke tanah. Nilai α kurang dari 0,8 pada pembumian efektif, sedangkan pembumian dengan tahanan nilai α 1,0. Biasanya tegangan dasar arrester dipilih antara 0,7-0,85 U_m (termasuk toleransi) pada sistem yang dikebunikan efektif. Dan pada sistem yang dikebunikan dengan tahanan besar tegangan dasarnya 1,2 U_m .

Pengenal Arrester

Pada umumnya pengenal atau rating arrester hanya pengenal tegangan. Pada beberapa tabung pelindung atau arrester jenis ekspulsi diperlukan juga pengenal arusnya untuk menentukan *thermal arrester capacity* tersebut.

Supaya pemakaian lebih efektif dan ekonomis, kita perlu karakteristik dari arrester tersebut, yaitu:

1. Pengenal tegangan: nilai tegangan paling sedikit sama dengan tegangan maksimum yang mungkin timbul selama adanya gangguan.
2. Karakteristik perlindungan atau impuls: gelombang tegangan impuls tertinggi yang terjadi pada terminal arrester sebelum arrester bekerja dinamakan tegangan percikan impuls maksimum (*maximum impulse spark over voltage*). Bentuk gelombang tegangan impuls

maksimum adalah 1,2 x 50 μ s (standar IEC) atau dalam standar USA 1,5 x 40 μ s. Jadi jika tegangan puncak surja petir yang datang mempunyai nilai yang lebih tinggi atau sama dengan tegangan percikan maksimum arrester, maka arrester akan bekerja memotong surja dan mengalirkan arusnya ke tanah.

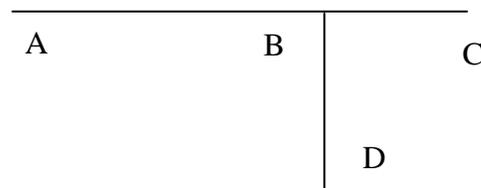
3. Kemampuan pemutusan arus frekuensi dasar. Arus pelepasan nominal adalah arus pelepasan dengan harga puncak dan bentuk gelombang yang digunakan untuk menentukan kelas dari arrester. Bentuk gelombang arus pelepasan nominal: 8 x 20 μ s (standar IEC) atau 10 x 20 μ s (standar USA). Dengan harga puncak arus: 20.000 A, 10.000 A, 5000 A dan 1500 A
4. Kemampuan menahan atau melewatkan arus surja.

ANALISIS TEGANGAN MAKSIMUM

Untuk mencari besar dan letak tegangan maksimum yang terjadi pada saluran yang mengalamisuatu titik diskontinuitas metoda yang cocok digunakan adalah metode diagram tangga (*bounce digram*). Dengan metode ini akan terlihat jelas posisi dan arah gerak dari setiap gelombang yang datang. Selain itu terdeteksi pengaruh redaman dan pantulan gelombang.

Parameter Saluran Kabel Bercabang Tunggal

Model saluran distribusi cabang tunggal digambarkan berikut :



Gambar 2. Model saluran distribusi cabang tunggal.

Besar impedansi surja kawat udara yang diambil adalah 500 Ohm (Hutahuruk, 1991 : 4). Sedangkan besar impedansi surja

kabel tergantung pada jenis kabel yang dipakai pada saluran. Untuk kabel XLPE 3 x 240 mm², impedansi surja kabelnya sebesar 39,56 Ohm. Sedangkan pada titik C dan titik D sebagai titik terbuka besar impedansi surjanya adalah tidak terhingga (∞).

Dari data induktansi dan kapasitansi di atas juga dapat diketahui kecepatan penjalaran gelombang pada kabel jenis tersebut. Dari persamaan didapat besar kecepatan penjalaran gelombang pada kabel jenis XLPE 3 x 240 mm² adalah 1.10^8 m.s⁻¹, sepertiga dari kecepatan penjalaran gelombang pada kawat udara.

Tegangan Pelepasan Arrester

Besar *rating arrester* untuk saluran distribusi 20 kV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} E_r &= 1,2 \times U_m \\ &= 1,2 \times 110 \% \times 20 \\ &= 26,4 \text{ kV} \end{aligned}$$

Dengan nilai 26,4 kV tersebut dapat ditentukan besar tegangan pelepasan arrester pada tabel Karakteristik Kerja Arrester dan tegangan pelepasan yang didapat adalah 139 kV.

Nilai Gelombang Petir

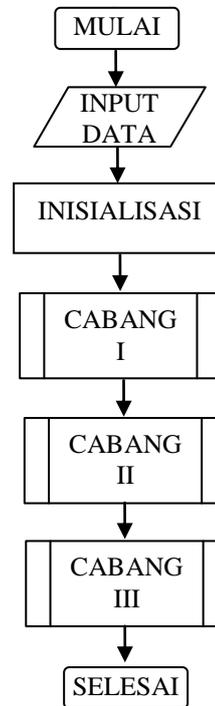
Bentuk gelombang standar menurut IEC (*International Electrotechnical Commission*) adalah $1,2 \times 50 \mu\text{s}$. Nilai 1,2 menyatakan waktu muka gelombang (Tf) dan 50 menyatakan waktu ekor gelombang (Tt).

Analisi dan Perhitungan Menggunakan Bantuan Program Komputer

Untuk mendapatkan penjalaran gelombang pada berbagai waktu sesuai dengan yang diinginkan secara lebih jelas, teliti dan terinci mengenai berapa besar tegangan pada titik-titik yang ada pada saluran diperlukan bantuan dengan menggunakan pemrograman komputer.

Bahasa pemrograman komputer yang dipakai adalah bahasa Pascal 7.0. Pemrograman ini dibuat berdasarkan

metode diagram tangga (*bounce diagram*). Logika atau diagram alir dari program adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Alur pemrograman (sumber: perencanaan)

Penyebaran Tegangan Maksimum

Gelombang surja petir yang akan dibahas pada analisis adalah gelombang petir yang telah melalui arrester, yaitu berupa tegangan pelepasan arrester. Ada dua jenis gelombang yang akan dianalisis, biasanya digunakan dalam pengujian trafo (Arismunandar, 1991 : 115). Yaitu gelombang yang terpotong pada muka dan gelombang penuh. Gelombang yang terpotong pada muka adalah gelombang yang mempunyai panjang gelombang sama dengan panjang muka gelombang, dalam analisis ini besarnya $1,2 \mu\text{s}$ (waktu muka petir standar) dengan besar 139 kV yang merupakan besar tegangan pelepasan *arrester*.

Dengan demikian letak tegangan maksimum pada penjalaran gelombang terpotong muka terdapat pada titik ujung cabang yang lebih pendek. Besar tegangan maksimum yang terjadi pada keseluruhan

kasus adalah 185,4 kV dan merupakan superposisi tegangan datang pada titik ujung dengan tegangan pantul dari titik tersebut. Sedangkan hasil perhitungan untuk gelombang penuh adalah seperti pada tabel 1 (lampiran).

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa besar dan letak tegangan maksimum yang terjadi pada kasus gelombang penuh bervariasi. Besar tegangan berkisar 186,7 – 309 kV. Letak tegangan maksimum terjadi pada saluran terpendek bila panjang AC lebih kecil dari panjang cabang. Dan tegangan akan terjadi pada cabang yang lebih panjang bila AC lebih besar dari panjang cabang.

PENUTUP

Dari analisis dan perhitungan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan mengubah-ubah konfigurasi letak dan panjang cabang saluran distribusi cabang tunggal, untuk kondisi peletakan arrester pada titik peralihan antara saluran udara dengan saluran kabel bawah tanah, tegangan maksimum surja petir terjadi pada kasus gelombang penuh, tegangan maksimum terletak pada titik acak, tetapi sebagian besar tegangan maksimum terjadi pada saluran terpendek bila panjang saluran sebelum percabangan lebih kecil dari panjang cabang. Dan sebaliknya tegangan maksimum terletak pada cabang yang lebih panjang bila panjang saluran sebelum percabangan lebih besar dari panjang cabang.
2. Perubahan letak dan panjang cabang juga berpengaruh pada besarnya tegangan surja petir maksimum, yaitu :
Sedang untuk kasus gelombang penuh besarnya bervariasi antara 187 kV – 309 kV

DAFTAR RUJUKAN

- Arismunandar, A.1990 *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita, Jakarta
- Arismunandar,A. 1991. *Teknik Tenaga Listrik*, Pradnya Paramita, Jakarta

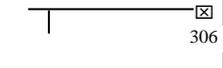
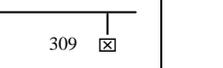
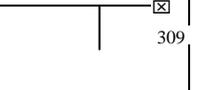
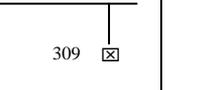
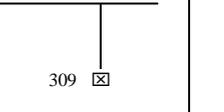
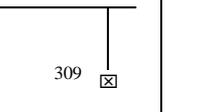
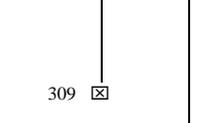
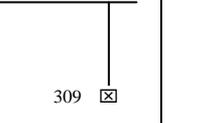
Hutahuruk, T.S. 1991. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*, Erlangga, Jakarta

Pansini, A.J. 1978. *Undergrouding Electric Lines*, Hayden Book Company, New Jersey

Turan Gonen. 1986. *Electric Power Distribution Engineering*, McGraw Hill Book Co, New York

LAMPIRAN

Tabel 1. Peletakan tegangan maksimum penuh

x \ y	20	40	60	80
25	 306	 309	 309	 309
50	 299,	 257,8	 309	 309
75	 300,8	 192	 309	 309
100	 187	 191,9	 309	 309