

**ANALISIS KERUGIAN DAYA PADA SALURAN TRANSMISI EHV (EXTRA HIGH VOLTAGE) DI PT. PLN
PERSERO PENYALURAN DAN PUSAT PENGATURAN BEBAN JAWA BALI REGIONAL
JAWA TENGAH DAN DIY UNIT PELAYANAN TRANSMISI UNGARAN**

Fathoni Azis, I Nengah Sumerti, Ngadirin

ABSTRAK

Listrik adalah sumber energi yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat sehingga dalam penyaluran energi tersebut harus benar-benar handal, tetapi dalam kenyataannya kerugian daya dalam sistem transmisi tidak dapat dihilangkan tetapi kerugian daya harus diupayakan dalam batas normal yaitu 5 – 15%. Kerugian daya yang terjadi pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi banyak diakibatkan oleh beberapa faktor misalnya kerugian daya yang diakibatkan oleh korona, resistan penghantar, kekotoran isolator dll. sehingga daya yang kirim dan daya diterima mengalami perbedaan nilainya, karena sebagian daya ada yang hilang diakibatkan oleh faktor-faktor tadi diatas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui berapa besar kerugian daya, jatuh tegangan, kerugian daya akibat korona dan nilai efisiensi yang terjadi pada saluran Ungaran – Pedan.

Kata Kunci : *Power loss, Bundled conductor, Resistance, Induktance*

PENDAHULUAN

Pusat-pusat listrik biasa juga disebut dengan sentral-sentral listrik (*electric power station*), biasanya letaknya jauh dari tempat-tempat dimana tenaga listrik itu digunakan terutama yang menggunakan tenaga air, karena itu tenaga listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui kawat-kawat saluran transmisi. Saluran-saluran transmisi membawa tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkitan ke pusat-pusat beban melalui saluran tegangan tinggi 150 kV atau melalui saluran ekstra tegangan tinggi 500 kV. Trafo penurunan akan merendahkan tegangan ini menjadi tegangan subtransmisi 70 kV yang kemudian digardu induk diturunkan lagi menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada gardu induk distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban tegangan diubah oleh trafo distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 V.

Saluran transmisi dilihat dari jarak atau panjangnya dapat dibedakan menjadi tiga yaitu :

1. Saluran transmisi jarak pendek (*short line*) adalah saluran yang panjangnya kurang dari 80 km.

2. Saluran transmisi jarak menengah (*medium line*) adalah saluran yang panjangnya antara 80-240 km.
3. Saluran transmisi jarak jauh (*long line*) adalah saluran yang panjangnya lebih dari 240 km.

Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas maka permasalahan yang akan diamati adalah sebagai berikut :

1. Berapa besar kerugian daya pada saluran transmisi tenaga listrik.
2. Berapa besar kerugian korona pada saluran transmisi tenaga listrik.
3. Berapa besar selisih tegangan yang terjadi antara tegangan pada pangkal pengiriman dengan tegangan pada ujung penerimaan.

Pembatasan Masalah

Penelitian ini hanya dilakukan pada satu saluran udara tenaga listrik tegangan tinggi saja yaitu saluran Ungaran – Pedan, dan tempat observasinya di PT PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa Bali Regional Jawa Tengah dan DIY Unit Pelayanan Transmisi Ungaran.

Analisis hanya menghitung resistan, reaktan transmisi transmisi, impedan, faktor

daya, besar tegangan pada pangkal pengiriman, besar tegangan pada ujung penerimaan, rugi daya, daya pengiriman serta efisiensi transmisi.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah.

1. Mengetahui rugi daya pada saluran transmisi tenaga listrik.
2. Mengetahui jatuh tegangan pada saluran transmisi tenaga listrik.
3. Mengetahui berapa besar faktor dayanya.

Manfaat

Suatu penelitian diharapkan dapat memberikan sumbangan yang berarti. Manfaat dari hasil studi ini adalah :

1. Studi ini dapat mengetahui besar kerugian dayanya apakah masih dalam batas normal atau sudah terlalu besar sehingga perlu tindakan lebih lanjut untuk mengurangi kerugian daya tersebut.
2. Studi ini dapat membantu mengetahui berapa besar beban yang bisa diberikan pada saluran tersebut.
3. Studi dapat membantu perlunya pemasangan reaktor shunt bila jatuh tegangannya terlalu besar.
4. Studi ini dapat membantu perlunya pemasangan kapasitor bila faktor dayanya mengalami penurunan yang besar.

Resistan

Resistan penghantar saluran transmisi adalah penyebab yang terpenting dari rugi daya pada saluran transmisi. Jika tidak ada keterangan lain maka yang dimaksud dengan istilah resistansi adalah resistansi efektif. Resistansi efektif dari suatu penghantar adalah :

$$R = \frac{\text{Rugi daya pada penghantar}}{|I|^2} \Omega$$

dimana daya yang dinyatakan dalam watt dan I adalah arus rms pada penghantar dalam ampere. Resistansi efektif sama dengan resistansi arus searah

(dc) dari saluran jika terdapat distribusi arus yang merata (*uniform*) diseluruh penghantar.

Induktansi Saluran

Induktansi kawat tiga fasa pada umumnya berlainan untuk masing-masing kawat. Namun karena perbedaannya kecil nilai induktansinya dari penghantar yang ditransposisikan yang diambil, bila ketidakseimbangannya tidak besar.

Untuk susunan kawat sistem saluran ganda reaktan induktif urutan positif (*positive sequence inductive reactance*) dari saluran yang ditransposisikan dinyatakan oleh W. A. Lewis sebagai :

$$X_L = 0,004657 f \log_{10} \frac{GMD}{GMR} (\Omega / \text{mile})$$

Kapasitansi Saluran

Kapasitansi adalah kemampuan dua konduktor yang dipisahkan oleh isolator untuk menyimpan muatan listrik pada tegangan yang diberikan diantara keduanya. Bila pada dua konduktor yang terpisah oleh jarak tertentu dialirkan arus listrik maka akan terbentuk fluks elektrostatik dan dua konduktor tersebut berfungsi sebagai kapasitor. Nilai kapasitansinya semata-mata tergantung dari jari-jari konduktor dan jarak antara kedua konduktor tersebut serta tidak dipengaruhi oleh besarnya medan magnet. Rumus untuk menentukan kapasitansi saluran adalah :

$$C = \frac{0,02413}{\log_{10} \frac{GMD}{r}}$$

Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Pada saluran bolak balik besarnya tergantung pada impedansi dan admitansi saluran serta pada beban dan faktor daya. Jatuh tegangan relative dinamakan regulasi tegangan (*voltage regulation*), dan dinyatakan oleh rumus :

$$\frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\%$$

Hilang Daya Dan Daya Guna Transmisi

Hilang daya atau rugi daya utama pada saluran transmisi adalah hilang daya resistan pada penghantar. Disamping itu ada hilang daya korona dan hilang daya karena kebocoran isolator terutama pada saluran tegangan tinggi. Pada saluran bawah tanah ada hilang daya elektrik dan hilang daya pada saluran kabel (*sheath*).

Hilang Daya Resistan

Hilang daya resistan untuk saluran tiga fasa tiga kawat untuk saluran transmisi yang pendek dinyatakan oleh persamaan :

$$P_1 = 3PRl$$

Pada saluran panjang dimana arus pemuat diperhitungkan

$$P_1 = 3RI (I^2 - I_c \sin \phi_r) + \frac{1}{3} I_c^2$$

Hilang Korona

Bila garis tengah (*diameter*) kawat kecil dibandingkan dengan tegangan transmisi, maka terjadilah gejala tegangan tinggi yang disebut korona. Biasanya gejala korona baru terjadi bila tegangan mencapai 77 KV atau lebih. Ada beberapa perhitungan-perhitungan teoritis dan empiris mengenai hilang korona tetapi teorinya belum diketahui dengan pasti. Menurut Peek hilang korona dinyatakan oleh :

$$P = \frac{1,286}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{D}{r}} r^2 (\log_{10} \frac{D}{r})^2 (E_g - m \delta E'_{g0}) 10^{-2}$$

(kW/km-1 kawat)

sedang menurut Sato :

$$P = \frac{A}{\delta} (f + 25) r^2 (E_g - m \delta E'_{g0}) 10^{-2}$$

Hilang Kebocoran Pada Isolator

Isolator mempunyai hilang daya dielektrik dan hilang daya kebocoran (*leakage*) pada permukaannya. Resistansi isolator dari permukaan isolator yang bersih besar sekali. Nilainya menjadi sangat berkurang menjadi beberapa ohm saja, bila permukaannya menjadi kotor (*polluted*) karena isolator tersebut terpasang di daerah-daerah industri atau tepi laut. Bila tegangan tinggi diterapkan pada isolator ini, lapisan

permukaannya yang lembab menguap dan menimbulkan busur api setempat yang kemudian bertambah besar sehingga menimbulkan lompatan api. Untuk isolator gantung 250 mm yang dikotori berlaku rumus tegangan lompatan api sbb :

$$V = \frac{28N}{(\frac{W}{0.1})^{1/5} \{1,5(k^{1/3} + 2) + \frac{5}{8} K\}}$$

Daya Guna Transmisi

Daya guna (*efficiency*) saluran transmisi adalah perbandingan antara daya yang diterima dan daya yang disalurkan.

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% = \frac{P_r}{P_r + P_H} \times 100\%$$

Konduktor Berkas (Bundled Conductors)

Pada tegangan ekstra tinggi yaitu tegangan diatas 230 kV, korona dengan akibatnya yaitu berupa rugi daya dan terutama timbulnya interferensi dengan saluran komunikasi akan menjadi sangat berlebihan jika rangkaianannya hanya mempunyai sebuah komunikasi dan hanya mempunyai sebuah penghantar per fasa. Dengan menggunakan dua penghantar atau lebih per fasa yang disusun berdekatan dibandingkan dengan jarak pemisah antara fasa-fasanya, maka gradien tegangan tinggi pada penghantar dalam daerah EHV dapat banyak dikurangi. Saluran semacam ini dikatakan sebagai tersusun dari penghantar berkas (*bundled conductors*). Berkas ini dapat terdiri dari dua, tiga atau empat penghantar. Berkas tiga penghantar biasanya menempatkan penghantar-panghantarnya pada sudut-sudut suatu segi tiga sama sisi dan berkas empat penghantar menempatkan penghantar-panghantarnya pada sudut-sudut suatu bujur sangkar.

Arus tidak akan terbagi rata dengan tepat antara panghantar-penghantar dalam berkas jika tidak dilakukan transposisi penghantar-penghantar dalam berkas tetapi perbedaannya tidak begitu penting dalam praktek, metode GMD

sudah cukup teliti untuk perhitungan-perhitungan.

Keuntungan lain yang sama pentingnya yang diperoleh dari pemberkasan ialah penurunan reaktan. Peningkatan jumlah penghantar dalam suatu berkas mengurangi efek korona dan mengurangi efek reaktan. Pengurangan reaktan disebabkan oleh kenaikan GMR berkas yang bersangkutan. Perhitungan GMR sudah tentu tepat sama dengan perhitungan untuk penghantar berupa lilitan. Masing-masing penghantar pada berkas dua penghantar misalnya dapat diperlakukan sebagai sebuah serat atau lilitan suatu penghantar dua lilitan.

Induktan Sendiri Dari Konduktor Berkas

Misalkan jumlah konduktor per fasa adalah n , dan dimisalkan bahwa tiap konduktor dilalui arus yang sama iA/n karena konduktor-konduktor itu dianggap ditransposisikan sempurna.

$$L_{1(eq)} = K \left\{ \ln \sqrt{\frac{1}{r_1' d_{12} \dots d_{1n}}} + \ln D_A \right\}$$

$L_{1(eq)}$ = reaktan induktif dari konduktor berkas yang terdiri dari n sub-konduktor

6.2 Rektansi Induktif Saluran Tiga Fasa Dengan Konduktor Berkas Yang Ditransposisikan

Bila kawat berkas terdiri dari n sub-konduktor dengan d_{AB} , d_{BC} dan d_{AC} merupakan jarak-jarak dari titik pusat kawat-kawat berkas fasa A, B dan C, maka.

$$X_1 = 0,14467 \log \frac{GMD}{GMR} \quad \text{Ohm/km}$$

dengan $GMD = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{AC}}$ meter

$$GMR = \sqrt[n]{r_1' d_{12} d_{13} \dots d_{1n}} \quad \text{meter}$$

GMR Dari Konduktor Berkas

GMR dari konduktor dimana sub-konduktor mempunyai jarak-jarak yang sama dan terletak pada suatu lingkaran dengan radius R , dapat diturunkan sebagai berikut.

a. Bila jumlah sub-konduktor 2, jadi $n = 2$:

$$GMR = \sqrt{r_1' S} = \sqrt{r_1' 2R} = R \sqrt{2 \frac{r_1'}{R}}$$

b. Bila jumlah sub-konduktor 3, jadi $n = 3$:

$$GMR = \sqrt[3]{r_1' x S^2} = \sqrt[3]{r_1' 3R^2} = R \sqrt[3]{3 \frac{r_1'}{R}}$$

c. Bila jumlah sub-konduktor 4, jadi $n = 4$:

$$GMR = 1,094 \sqrt[4]{r_1' x S^3} = R \sqrt[4]{4 \frac{r_1'}{R}}$$

d. Bila jumlah sub-konduktor n maka diperoleh bentuk umum :

$$GMR = R \sqrt[n]{n \frac{r_1'}{R}}$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Data Penghantar Yang Digunakan

Data yang diambil adalah data untuk saluran transmisi 500 KV yaitu pada saluran transmisi Ungaran – Pedan. Penghantar yang digunakan pada saluran Ungaran – Pedan adalah penghantar jenis DOVE.

Diameter dari penghantar jenis DOVE adalah 2,04 cm, sedangkan luas penampangnya adalah $A = 327,94 \text{ mm}^2$ dan resistivitasnya $2,83 \times 10^{-6}$ mikro-ohm-cm, sehingga diperoleh resistansi per fasanya adalah.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$= 2,83 \times 10^{-6} \frac{10^5}{327,94 \times 10^{-2}}$$

$$= 0,0862 \text{ ohm/km}$$

Untuk konduktor pilin lebih dari dua lapis resistansi kawat dikalikan 1,02. sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan pengaruh dari pilin tersebut.

$$= 0,0862 \times 1,02$$

$$= 0,0880 \text{ ohm/km}$$

Perhitungan Rugi Daya

Pada saluran transmisi 500 KV Ungaran – Pedan adalah merupakan saluran tiga fasa sistem tiga kawat, jarak antar fasa pada saluran transmisi 500 KV Ungaran – Pedan adalah, $D = 11 \text{ m}$. Pada setiap fasanya menggunakan empat penghantar hal ini dilakukan untuk mengurangi rugi daya yang diakibatkan oleh korona dan terutama timbulnya interferensi dengan saluran komunikasi akan menjadi sangat berlebihan jika rangkaiannya hanya mempunyai sebuah

komunikasi dan hanya mempunyai sebuah penghantar per fasa. Dengan menggunakan dua penghantar atau lebih per fasa yang disusun berdekatan dibandingkan dengan jarak pemisah antara fasa-fasanya, maka gradien tegangan tinggi pada penghantar dalam daerah EHV dapat banyak dikurangi. Berkas empat penghantar biasanya menempatkan penghantar-panghantarnya pada sudut-sudut suatu bujur sangkar. Keuntungan lain yang sama pentingnya yang diperoleh dari pemberkasan ialah penurunan reaktan dan mengurangi efek korona. Sedangkan jarak antara sub konduktor penghantar berkas pada saluran transmisi 500 KV Ungaran – Pedan adalah, $d = 60$ cm.

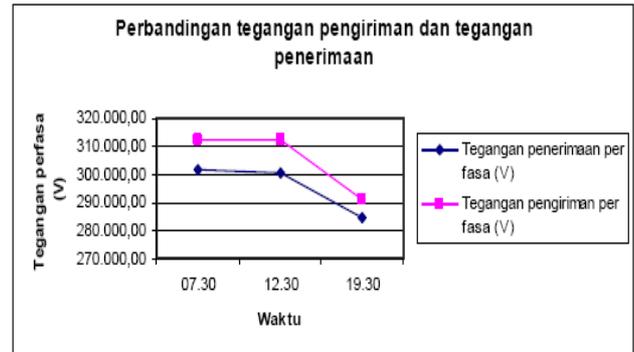
Tabel 1. Hasil perhitungan rugi daya

Parameter Ukur	Kamis, 25 Agustus 2005		
	jam 07.30	jam 12.30	jam 19.30
Arus (A)	420	470	280
Cos ϕ	0,98	0,98	0,78
V_r (Watt)	301.954,1908	300.799,4902	284.633,6827
V_s (Watt)	312.086,0608	312.137,5352	291.388,2627
Jatuh tegangan	3,35	3,76	2,37
P_{rugi} (Watt)	3.507.114,24	4.391.845,44	1.558.717,44
P_s (Watt)	373.507.114,24	379.391.845,44	141.558.717,44
P_r (Watt)	370.000.000	375.000.000	140.000.000
Efisiensi	99,06	98,84	98,89

Pada jam 12.30 jatuh tegangan yang terjadi adalah sebesar 3,76%. Jatuh tegangannya pada jam ini lebih besar dibandingkan pada pagi hari yaitu pada jam 07.30 yang cuma sebesar 3,35% sehingga rugi daya yang terjadi pada jam ini juga lebih besar dibandingkan pada pagi hari yaitu pada jam 07.30, sedangkan efisiensi transmisi pada siang hari adalah sebesar 98,84%, nilai efisiensinya lebih rendah dibandingkan dengan pagi hari karena pada jam 12.30 jatuh tegangannya lebih besar.

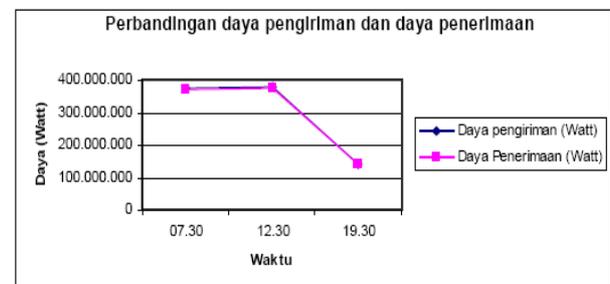
Perbandingan tegangan pengiriman dan tegangan penerimaan pada jam 19.30 adalah 2,37%, sehingga jatuh tegangan yang terjadi lebih kecil dibandingkan pada jam 07.30 dan pada jam 12.30, karena jatuh tegangannya kecil maka nilai efisiensi transmisi besar yaitu mencapai 98,89% dan rugi daya yang paling kecil juga terjadi pada

jam 19.30. Hal ini banyak dipengaruhi oleh tegangan fasanya, arus dan resistansi penghantarnya. Hasil analisis lebih lanjut tentang perbandingan tegangan pengiriman dan tegangan penerimaan akan dideskripsikan dalam bentuk grafik dibawah ini sehingga lebih mudah dipahami.



Gambar 1. Grafik perbandingan tegangan pengiriman dan tegangan penerimaan

Pada grafik diatas jatuh tegangan yang terkecil terjadi pada jam 19.30, sedangkan jatuh tegangan yang terbesar terjadi pada jam 12.30, sedangkan untuk perbandingan daya pengiriman dan daya penerimaan akan dijelaskan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2. Grafik perbandingan daya pengiriman dan daya penerimaan

Pada gambar grafik diatas rugi daya yang terkecil terjadi pada jam 19.30 sedangkan rugi daya yang terbesar terjadi pada jam 12.30, sehingga nilai efisiensi terbesar yang dapat dicapai adalah pada malam hari yaitu pada jam 19.30. Hal ini banyak dipengaruhi oleh pemakaian beban pada malam hari lebih sedikit dibandingkan pada siang hari dan pagi hari.

Perhitungan Rugi Korona

Bila tegangan arus bolak-balik pada suatu kawat dinaikan terus-menerus, maka dicapai suatu harga yang dikenal sebagai tegangan krisis visual, pada tegangan mana kelihatan cahaya violet yang disebut korona. Pada saluran transmisi EHV, masalah korona sudah harus diperhitungkan, sebab pada tegangan diatas 100 kV gejala korona sudah mulai serius. Ada beberapa perhitungan-perhitungan teoritis dan empiris mengenai hilang korona diantaranya adalah menurut Peek, Sato, persamaan Peterson, persamaan Holm dan persamaan diagramatik dari Caroll. Analisis perhitungan korona yang terjadi pada saluran transmisi Ungaran – pedan akan dihitung dengan cara sato seperti pada persamaan (2.14) sebagai berikut.

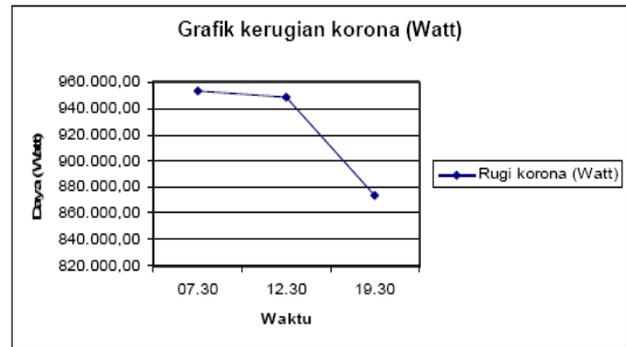
$$P = \frac{A}{\delta} (f + 25)r^2 (E_g - m\delta E'_{g0})10^{-2}$$

Faktor udara m_i adalah 1,0 untuk udara baik dan 0,8 untuk hujan. Suhu keadaan standar adalah 20°C dan tekanan udaranya adalah 760 mmHg. Faktor permukaan kawat untuk kondisi permukaan kawat halus adalah 1,0 dan untuk kawat lilit adalah 0,83 – 0,87.

Tabel 2. Rugi daya akibat korona

Jam	UNGERAN – PEDAN	
	Rugi korona (Watt)	Rugi korona dalam (%)
07.30	953.637,7143	27,19
12.30	948.324,1674	21,59
19.30	873.852,3438	56,06

Dari data diatas diketahui bahwa rugi daya terbesar yang diakibatkan oleh korona terjadi pada jam 07.30, hal ini dipengaruhi oleh tegangan fasanya, suhu dan tekanan udara. Dibandingkan dengan kerugian daya keseluruhan pada tiap-tiap waktu, maka kerugian daya terbesar yang diakibatkan oleh faktor korona adalah terjadi pada jam 07.30 karena mencapai 953.637,7143 Watt, sedangkan kerugian daya total pada saat itu adalah 3.507.114,24 Watt.



Gambar 3. Grafik kerugian daya yang diakibatkan oleh korona.

PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis beban selama penelitian maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pembebanan saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 kV Ungaran – Pedan masih sangat kecil sekali jika dibandingkan dengan arus nominal saluran sebesar 2078 A, sehingga masih dalam batas yang aman.
2. Nilai efisiensi saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 kV Ungaran – Pedan masih sangat baik sekali karena rata-rata mendekati 100%.
3. Jatuh tegangan yang terjadi pada saluran udara tegangan ekstra tinggi Ungaran – Pedan rata-rata masih sangat kecil sekali, karena masih dibawah standarnya yaitu antara 5% sampai 15%.
4. Kerugian daya utama pada penghantarnya untuk saluran udara tegangan ekstra tinggi 500 kV Ungaran – Pedan masih sangat kecil sekali sehingga tidak perlu adanya penggantian atau perbaikan alat dan bahan pada saluran tersebut.
5. Kerugian daya yang diakibatkan oleh korona pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV Ungaran – Pedan juga masih dalam batas yang normal sehingga tidak membuat kerugian daya

bertambah besar karena diakibatkan oleh faktor korona tersebut.

B. Saran

Melihat dari berbagai persoalan tentang kerugian daya pada saluran transmisi tersebut maka dapat disarankan bahwa kerugian daya pada saluran Ungaran – Pedan masih sangat kecil sekali sehingga dapat dibebani lebih tinggi lagi selama itu tidak melebihi kapasitasnya.

DAFTAR PUSTAKA

Arismunandar. A. dan Kuwahara. S. 1993. **Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik.** Jakarta: Pradnya Paramita.

[http://www.google.com/ bundled conductor](http://www.google.com/bundled conductor)

Hutauruk. T.S. 1985. **Transmisi Daya Listrik.** Jakarta : Erlangga.

Sulasno.1993. **Analisa Sistem Tenaga Listrik.** Semarang : Satya Wacana.

William. D. dan Stevenson. Jr. 1990. **Analisa Sistem Tenaga Listrik.** Bandung: Erlangga

Zuhal. 1988. **Dasar Teknik Tenaga Listrik.** Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

BIOGRAFI

Fathoni Azis, lahir di Kota Baru, 17 November 1981. Sejak tahun 2001 menjadi mahasiswa Universitas Negeri Semarang (UNNES) jurusan Teknik Elektro S1 dan telah dinyatakan lulus skripsi tanggal 7 Januari 2006. Bidang yang diminati adalah Sistem Tenaga Listrik.

I Nengah Sumerti, dosen Teknik Elektro UGM menekuni bidang Sistem Tenaga Listrik.

Ngadirin, dosen Elektro UNNES, menekuni bidang Sistem Tenaga Listrik