

Susut Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Saluran Distribusi Tegangan Rendah

Een Taryana

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani (UNJANI)

Email : eentaryana@yahoo.co.id

Abstrak. Pada sistem pembebanan yang tidak seimbang dalam sistem tiga-fasa empat-kawat, susut daya pada saluran distribusi akan lebih besar dibandingkan pada kondisi beban tidak seimbang. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi pembebanan yang ekstrim dimana beban hanya terpasang pada salah satu fasa saja susut daya pada saluran distribusi akan lebih besar enam kali dibandingkan pada kondisi beban seimbang.

Kata kunci : *Sistem tiga-fasa empat-kawat, beban tidak seimbang, susut daya*

1 Latar Belakang Masalah

Sistem distribusi merupakan salah satu sistem dalam tenaga listrik yang mempunyai peran penting karena berhubungan langsung dengan pemakai energi listrik, terutama pemakai energi listrik tegangan menengah dan tegangan rendah. Saat ini tenaga listrik merupakan kebutuhan yang utama, baik untuk kehidupan sehari-hari maupun untuk kebutuhan industri. Hal ini disebabkan karena tenaga listrik mudah untuk ditransportasikan dan dikonversikan ke dalam bentuk tenaga yang lain. Penyediaan tenaga listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik.

Dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik tersebut, terjadi pembagian beban-beban yang pada awalnya merata tetapi karena ketidakserempakan waktu penyalan beban-beban tersebut maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik [1]. Ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S, dan fasa T) inilah yang menyebabkan terjadinya susut daya di jaringan.

Seperti telah disampaikan oleh pihak PT. PLN (Persero), bahwa susut daya di saluran secara keseluruhan sebesar kira-kira 10 % dari total daya yang disalurkan [2], [3], [4]. Tentunya jika susut daya tersebut dapat dikurangi, akan memberikan penghematan dan efisiensi kepada pihak PLN sebagai penyedia energi listrik.

Secara umum susut daya di saluran distribusi disebabkan oleh parameter saluran. Untuk sistem tiga-fasa, susut daya juga dapat disebabkan oleh ketidakseimbangan beban.

Ketidakseimbangan sistem penyaluran tiga-fasa dapat disebabkan karena beberapa faktor, diantaranya karena harmonisa yang terlalu besar, karena terjadi gangguan dan juga karena pembebanan yang tidak seimbang.

Berdasarkan latar belakang di atas, dalam makalah ini akan dicoba dijelaskan lebih lanjut mengenai susut daya yang disebabkan karena ketidakseimbangan pembagian beban. Dengan mengetahui besarnya rugi-rugi akibat ketidakseimbangan beban, diharapkan akan lebih mudah dalam mencari solusi alternatif untuk mengatasinya.

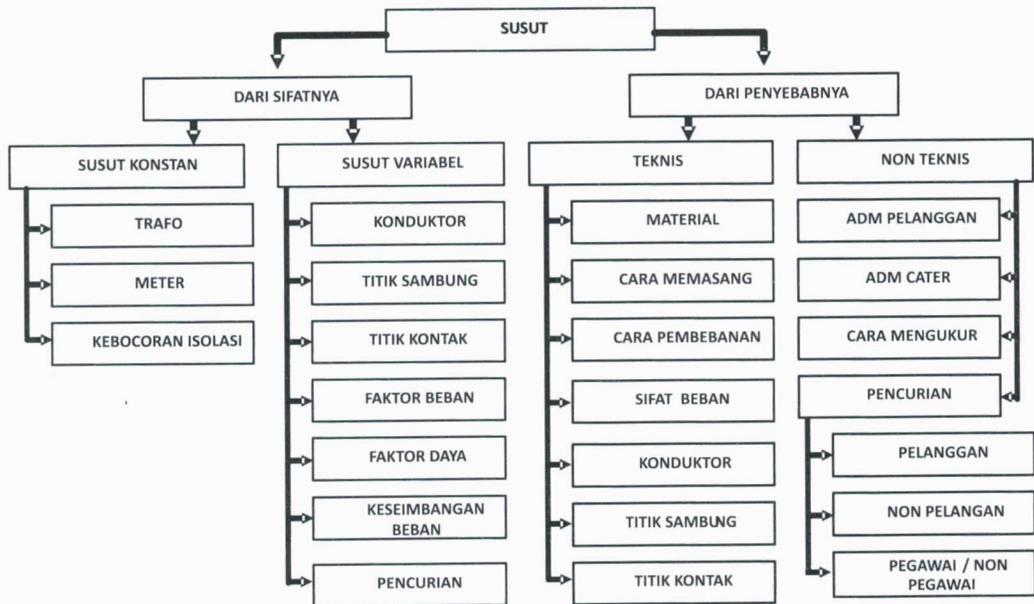
2 Susut Daya Pada Sistem Distribusi

Difinisi Susut Distribusi

Susut jaringan distribusi dalam sistem ketenagalistrikan merupakan kehilangan kWh energi yang tidak dapat dimanfaatkan, sehingga hal ini merupakan salah satu bentuk pemborosan energi serta menurunkan efisiensi.

Masalah susut adalah masalah efisiensi pendistribusian tenaga listrik yang berkaitan langsung dengan manajemen pembebanan sistim tenaga listrik (harus dilakukan evaluasi dan pengendalian sampai pada batas yang wajar secara terus-menerus berkesinambungan).

Susut energi pada sistim distribusi dapat dilihat dari segi sifat dan dari penyebabnya susut yang terjadi, seperti yang digambarkan pada skema dibawah ini :



Gambar 1. Skema Struktur Susut(Losses)

2.1.1 Susut Konstan

Susut konstan yaitu susut yang timbul secara konstan (terus menerus) pada sistim distribusi tenaga listrik yang tidak dipengaruhi oleh fluktuasi beban (sepanjang sumber tegangan masih ada), antara lain seperti : rugi-rugi besi trafo, kwh meter, kebocoran isolasi dsb.

- Pada trafo distribusi terdapat susut konstan yang berupa rugi-rugi besi sebesar 0,10 s/d 0,40 % dari daya trafo (contoh pada trafo 25 kVA terjadi rugi-rugi besi sebesar 100 watt dan pada trafo 6.300 kVA terjadi rugi-rugi besi sebesar 6.500 watt.
- Pada setiap kWh meter mekanik membutuhkan daya antara 1,5 s/d 2 watt untuk dapat menggerakkan kWh meter tersebut.
- Pada isolasi sistim jaringan listrik harus memiliki tahanan isolasi sebesar $\geq 1\text{k}\Omega/\text{volt}$ atau kebocoran maksimum yang diijinkan adalah $\leq 1\text{ volt}/1.000\ \Omega = 0,001\ \text{ampere}$ atau susut maksimum yang diijinkan pada sistim TR : $220\ \text{volt} = 0,001\ \text{ampere}^2 \times 220.000\ \Omega = 0,22\ \text{watt}$ dan sistim TM : $20\ \text{kV} = 0,001\ \text{ampere}^2 \times 20.000.000\ \Omega = 20\ \text{watt}$.

- Untuk memperkecil prosentase susut konstan pada trafo distribusi maka tidak ada jalan lain kecuali mengatur pembebanan trafo pada kondisi beban optimum dimana efisiensinya paling tinggi yakni pada beban antara 70 s/d 80 dari kapasitasnya.
- Untuk memperkecil prosentase susut konstan pada setiap kWh meter mekanik maka penggunaan energi listrik yang melalui meter tersebut harus ditingkatkan agar ratio kWh susut konstan di kWh meter dengan pemakaian energi listrik (kWh) yang terukur menjadi kecil (contoh : pemakaian pelanggan A sebesar 30 kWh / bulan dengan pemakaian pelanggan B sebesar 100 kWh / bulan akan memiliki ratio susut konstan untuk pelanggan A = $(2/1.000 \text{ kW} \times 720 \text{ jam}) / (30 \text{ kWh}) \times 100 \% = 4,8 \%$, sementara untuk pelanggan B = $(2/1.000 \text{ kW} \times 720 \text{ jam}) / (100 \text{ kWh}) \times 100 \% = 1,44 \%$.
- Jika terjadi kebocoran pada isolasi sistim jaringan listrik, misalnya karena keretakan isolator atau adanya sisa benang layang² sehingga tahanan isolasi berkurang sebesar 10 % maka akan terjadi perubahan susut konstan yang semula pada sistim TR = 0,22 watt dan sistim TM : 20 kV = 20 watt, menjadi 0,24 watt pada sistim TR dan 22,18 watt pada sistim TM

2.1.2 Susut Variabel

Yakni susut yang timbul secara variabel (berubah-ubah) pada sistim distribusi tenaga listrik yang dipengaruhi oleh fluktuasi beban (naik-turunnya beban), antara lain seperti : rugi-rugi penghantar (I^2R), titik sambung / titik kontak dsb.

2.1.3 Susut Teknis

Susut Teknis akan memunculkan alternatif penanganan Energi yang hilang pada sistem jaringan distribusi karena faktor karakteristik dan kondisi teknis

Penyebab susut (losses) kWh dari segi teknis :

- Ukuran penghantar yang kurang optimum (yang dipengaruhi oleh Faktor Beban dan Faktor Distribusi Beban).
- Jaringan yang terlalu panjang.
- Tingkat isolasi yang telah menurun dibawah batas minimal (pada isolator, minyak trafo, kabel, arrester dsb.).
- Pembebanan yang tidak seimbang (timbulnya I_0).
- Faktor Daya (Cos Q), yang rendah (timbulnya daya reaktif)
- Ketidak akuratan dari alat ukur meter kWh, CT maupun PT (timbulnya selisih hasil ukur).
- Titik sambung / kontak yang kurang sempurna (timbulnya panas yang berlebihan sehingga mengurangi energi).
- Pengawatan alat ukur yang salah pada urutan fasa/polaritas (timbulnya selisih ukur)
- Kebocoran arus melalui pepohonan atau sisa benang layang² yang menyentuh jaringan (timbulnya kebocoran energi)
- Pengaruh harmonisa (Power Quality) sehingga mempengaruhi pengukuran (apabila peralatan ukur yang dipakai tidak memenuhi syarat).
- Pembebanan trafo yang tidak seimbang antar fasanya
- Pembebanan trafo melebihi kapasitas dalam waktu yang lama (Over load) Loss Kontak pada peralatan listrik
- Pemasangan trafo arus (CT) terlalu besar tidak sesuai dengan
- daya yang diukur
- Akurasi alat ukur (kWh meter)

2.1.4 Susut Non Teknis

Susut Non Teknis adalah energi yang hilang bukan karena sebab teknis, diantaranya karena salah pengukuran, salah perhitungan, salah catat, salah baca, salah data entri baik disengaja maupun tidak disengaja

Penyebab susut (losses) kWh dari segi non teknis :

- Data Induk Langganan (DIL) yang tidak akurat.
- Pembacaan/pencatatan angka stand kWh meter yang tidak tepat/benar (waktu, angka, penafsiran, faktor kali dsb.).
- Pencurian aliran listrik oleh pelanggan maupun non pelanggan.
- Pemakaian sendiri yang tidak terukur / tercatat.
- Cara perhitungan yang tidak tepat / benar.
- Transportasi kWh meter
- Salah wiring APP
- Salah baca meter
- Salah entri data, proses billing (Pengolahan data)
- Rekening nol kWh
- Rekening pelanggan baru yang belum terbit
- Koreksi rekening
- Sambungan tarif pesta
- RBM belum lengkap
- DIL tidak akurat
- APP tidak disegel
- Pelanggaran oleh konsumen
- Pelanggan non konsumen , dsb.

2.2 Hambatan Dalam Pengendalian Susut (losses) kWh

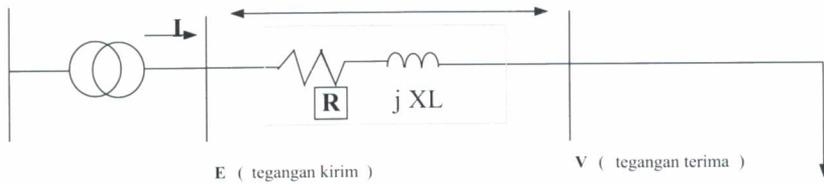
- Data yang kurang lengkap dan kurang akurat.
- Daerah pelayanan yang semakin luas.
- Ketersediaan anggaran yang sangat terbatas.
- Tingkat kesadaran sebagian masyarakat pelanggan maupun non pelanggan,
- pegawai maupun non pegawai yang kurang mendukung.
- Masih terbatasnya kuantitas maupun kualitas SDM yang ada.

2.3 Langkah Pengendalian & Penanggulangan

- Pengumpulan data dan statistik.
- Pengujian dan pengukuran susut.
- Pemetaan susut.
- Menentukan skala prioritas (dengan AMR= Analisa Manajemen Risiko / GKM = Gugus Kendali Mutu).
- Menyusun langkah pengendalian.
- Melaksanakan kegiatan pengendalian.& melakukan evaluasi hasil kegiatan.

2.4 Jatuh Tegangan Dalam Sistem Distribusi

2.4.1 Satu Titik Beban



Gambar 2. Dengan Satu Titik Beban

$$\Delta V = E - V$$

Voltage Drop

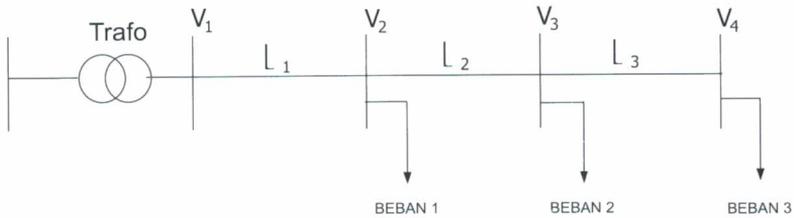
$$E = V + I(R + jX)$$

(1)

Dimana : R : Tahanan Jangkar (Ω/km)

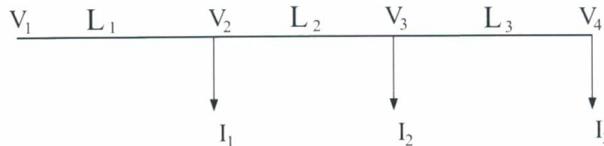
E : Reaktansi Jaringan (Ω/km)

2.4.2 Beban Tersebar



Gambar 3. Dengan Beban Tersebar

Untuk Menentukan ΔV total dengan cara terlebih dahulu menentukan titik pusat beban yaitu dengan cara metode momen.

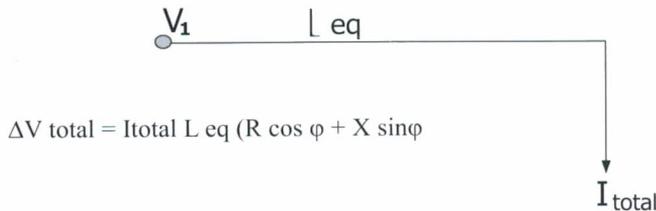


Gambar 4. Single Line Beban Tersebar

$$I_{\text{total}} \cdot L_{\text{eq}} = I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3$$

$$L_{\text{eq}} = \frac{I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3}{I_1 + I_2 + I_3}$$

(2)



Gambar 5. Single Line Satu Titik Beban

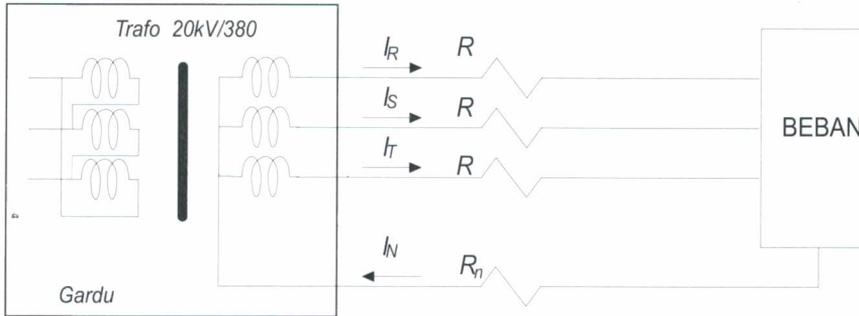
$$I_{\text{total}} \cdot L_{\text{eq}} = I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3$$

$$L_{\text{eq}} = \frac{I_1 L_1 + I_2 L_2 + I_3 L_3}{I_1 + I_2 + I_3}$$

3 Susut Daya Pada Saluran Distribusi Tegangan Rendah

3.1 Pendahuluan

Sistem distribusi tegangan umumnya menggunakan konfigurasi tiga-fasa empat-kawat dalam menyalurkan energi listriknya. Konfigurasi ini dipilih karena sistem dapat melayani beban satu dan tiga-fasa. Skema umum dari konfigurasi ini ditunjukkan pada Gb.6.



Gambar 6. Konfigurasi tiga-fasa empat-kawat

Dalam skema diatas terlihat dalam gardu trafo terdapat trafo penurun tegangan dengan 20 kV ke 480 V. Pada sisi tegangan menengah (20kV) belitan trafo terhubung delta sedangkan pada sisi tegangan rendah (480 V) belitan trafo terhubung bintang. Simbol R merepresentasikan resistansi saluran di masing-masing arus fasa, sedangkan simbol R_n merepresentasikan saluran pada kawat netral. Resistansi saluran dibuat berbeda karena umumnya ukuran kawat netral dapat lebih kecil dari ukuran kawat fasanya.

3.2 Analisis Susut Daya

Dalam makalah ini penulis hanya menganalisis susut daya yang diakibatkan oleh saluran, sedangkan susut daya akibat rugi-rugi didalam trafo tidak dilakukan. Analisis menggunakan asumsi tegangan sumber atau tegangan keluaran trafo dianggap seimbang dan sinusoidal, jenis beban terpasang beban linier dan tidak ada harmonisa dalam sistem.

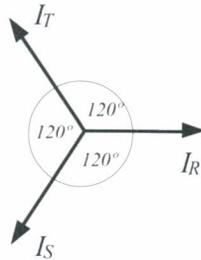
Dengan mengamati Gb.6 di atas maka susut daya pada saluran distribusi dapat ditulis seperti dalam persamaan (3) dengan dengan I_R, I_S, I_T adalah arus fasa R, S, T dan P_{loss} adalah susut daya disaluran.

$$\begin{aligned}
 P_{loss} &= I_R^2 R + I_S^2 R + I_T^2 R + I_N^2 R_N \\
 &= (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2)R + I_N^2 R_N
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Tampak dari persamaan diatas susut daya disaluran merupakan daya yang diserap oleh masing-masing kawat fasa dan netral saluran yang nilainya. Semakin besar arus yang mengalir dengan menggunakan kawat yang sama maka akan semakin besar susut daya pada salurannya. Semakin besar nilai resistansi kawat saluran, jika arus yang mengalirnya sama besar maka semakin besar susut dayanya.

3.2.1 Susut Daya Pada Kondisi Seimbang

Arus masing-masing fasa dalam sistem tiga-fasa mempunyai magnitudo yang tidak atau dapat sama besar dengan masing-masing fasa berdeda 120° , dilukiskan dalam Gb.7.



Gambar 7. Vektor arus tiga-fasa

Dengan mengamati konfigurasi pada Gb. 6, jika tegangan sumber diasumsikan seimbang, dan beban yang terpasang seimbang juga maka arus masing-masing fasa besarnya sama, karena sama disimbolkan dengan I saja, secara matematik dapat ditulis seperti dalam persamaan (4)

$$I_R = I_S = I_T = I \tag{4}$$

Arus netral merupakan penjumlahan secara vektor dari ketiga arus fasa, secara matematik dapat ditulis seperti dalam persamaan (5) Pada kondisi seimbang karena-arus masing-masing fasanya sama dan berbeda 120° , maka arus netralnya sama dengan nol.

$$I_N = I_R + I_S + I_T \tag{5}$$

Jika resistansi saluran kawat fasa dan kawat netral dianggap sama maka persamaan (3) dapat ditulis kembali menjadi persamaan (6)

$$P_{loss} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2)R \tag{6}$$

Pada kondisi beban seimbang dan tegangan sumber seimbang serta faktor daya beban sama, maka arus yang mengalir pada kawat fasanya akan sama besar (lihat persamaan (4)), dan dengan menggunakan persamaan (6) arus netral sistem akan bernilai nol. Dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (6), maka pada kondisi seimbang susut daya pada saluran distribusi dengan menggunakan konfigurasi tiga-fasa empat kawat diperoleh persamaan (7).

$$P_{loss} = 3I^2R \tag{7}$$

Tampak dalam persamaan susut daya diatas susut daya hanya diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran kawat fasa sedangkan rugi-rugi pada saluran kawat netralnya tidak ada.

3.2.2 Susut Daya Pada Kondisi Tidak Seimbang

Dalam prakteknya kondisi pada sistem distribusi energy listrik tidak akan pernah didapat. Jadi mungkin persamaan susut daya seperti ditulis dalam (7) tidak akan pernah dipakai dan arus netral nol tidak mungkin didapat.

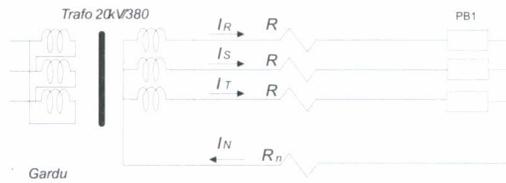
Ada banyak kondisi tidak seimbang dalam sistem pendistribusian energi listrik yang menggunakan konfigurasi tiga-fasa empat kawat. Dalam prakteknya kondisi tidak seimbang yang ditemukan adalah beban terpasang pada ketiga fasa dengan tetapi arus masing-masing fasanya tidak sama besar dan arus mengalir pada kawat netral. Tetapi mungkin saja kondisi ketidakseimbangan ekstrim terjadi dalam saluran distribusi. Kondisi ketidakseimbangan ekstrim tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Beban hanya terpasang pada salah satu fasa saja
- b. Beban hanya terpasang pada dua fasa saja

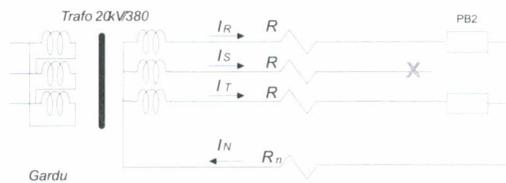
Bagaimana susut daya pada saluran pada kondisi tidak seimbang dibandingkan kondidi beban seimbang akan dianalisi dalam bab ini. Jika beban yang terpasang merupakan beban satu-fasa

maka untuk mengamati perbedaan tersebut penulis melukiskan kondisi beban seimbang dan beban tidak seimbang pada sistem tiga-fasa empat kawat dalam Gb.8.

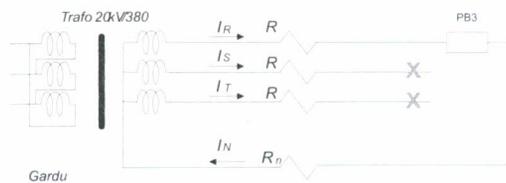
Dalam menganalisis ketidakseimbangan ini diasumsikan tegangan sumber seimbang, beban terpasang mempunyai sifat resistip murni, resistansi saluran kawat fasa dan netral sama.



(a) Sistem seimbang, Sistem tidak seimbang,



(b) Sistem tidak seimbang, beban terpasang pada dua fasa saja



(c) Sistem tidak seimbang, beban terpasang pada salah satu fasa saja

Gambar 8. Pembebanan Pada Sistem Tiga-Fasa Empat Kawat

Dalam melakukan analisis harus diasumsikan daya yang digunakan oleh pelanggan pada ketiga kondisi tersebut sama besar. Sedangkan persamaan umum dari daya seperti pada persamaan (8).

$$P_{beban} = P_{B1} = P_{B2} = P_{B3} \tag{8}$$

$$P = VI \cos \varphi \tag{9}$$

Pada kondisi seimbang arus dalam kawat fasa akan mengalir sama dan besarnya adalah sepertiga dari arus beban I , sedangkan arus netralnya sama dengan nol. Dengan mensubstitusikan persamaan (9) ke persamaan (7) diperoleh susut daya saluran seperti dalam persamaan (10).

$$I_F = \frac{I}{3} \tag{10}$$

$$P_{loss} = 3 \left(\frac{I}{3} \right)^2 R \tag{11}$$

$$= \frac{1}{3} I^2 R$$

Pada kondisi tidak seimbang dan beban hanya terpasang pada dua fasa saja, diperoleh arus yang mengalir dalam kedua fasa tersebut masing-masing ditunjukkan pada persamaan (12), dan arus netralnya diperoleh seperti pada persamaan (13).

$$I_F = \frac{I}{2} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} I_N &= \frac{I}{2} \angle 0^\circ + \frac{I}{2} \angle 120^\circ \\ &= \frac{I}{2} \angle 60^\circ \\ &= \frac{I}{2} \end{aligned} \tag{13}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (12) dan (13) ke persamaan (6) diperoleh susut daya pada saluran seperti dalam persamaan (14).

$$\begin{aligned} P_{loss} &= \left[\left(\frac{I}{2} \right)^2 + 0 + \left(\frac{I}{2} \right)^2 + \left(\frac{I}{2} \right)^2 \right] R \\ &= \frac{3}{4} I^2 R \end{aligned} \tag{14}$$

Pada kondisi tidak seimbang dan beban hanya terpasang salah satu fasa saja, diperoleh arus yang mengalir dalam salah satu fasa pada persamaan (15), dan arus netralnya diperoleh seperti pada persamaan (16).

$$I_F = I \tag{15}$$

$$I_N = I \tag{16}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (15) dan (16) ke persamaan (6) diperoleh susut daya pada saluran seperti dalam persamaan (17).

$$\begin{aligned} P_{loss} &= [I^2 + 0 + 0 + I^2] R \\ &= 2I^2 R \end{aligned} \tag{17}$$

Jika kita bandingkan dari ketiga kondisi pembebanan diatas maka susut daya pada saluran distribusi dari masing-masing pembebanan tersebut diperlihatkan dalam Kondisi : A : beban seimbang, B; Beban tidak seimbang, terpasang di dua fasa, C: Beban tidak seimbang terpasang di salah satu fasa saja.

Tabel 1. Perbandingan Susut Daya Pada Saluran

No	Kondisi	Arus Saluran				Susut daya
		R	S	T	N	
1	A	$\frac{I}{3}$	$\frac{I}{3}$	$\frac{I}{3}$	0	$\frac{1}{3} I^2 R$
2	B	$\frac{I}{2}$	0	$\frac{I}{2}$	$\frac{I}{2}$	$\frac{3}{4} I^2 R$
3	C	I	0	0	I	$2I^2 R$

4 Kesimpulan

Hasil analisis, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu :

1. Susut daya pada saluran jaringan tegangan rendah dipengaruhi oleh sistem keseimbangan beban.
2. Susut daya paling besar pada system distribusi tegangan rendah yang menggunakan konfigurasi tiga-fasa empat kawat diperoleh pada saat beban terhubung pada salah-satu fasa saja. Pada kondisi ini susut daya disaluran dapat enam kali lebih besar dibandingkan sistem yang seimbang.

5 Daftar Pustaka

- [1] Djiteng Marsudi, "*Pembangkitan energi listrik*". Jakarta, PT. Gramedia.
- [2] P.T PLN (Persero) Distribusi Jawa Batar dan Banten, "*Pengendalian susut*"
- [3] P.T PLN (Persero) Distribusi Jawa Batar dan Banten, "*Penurunan susut distribusi*"
- [4] P.T PLN (Persero) Distribusi Jawa Batar dan Banten, "*Sambungan listrik*"
Desember, 2005.
- [5] Sumanto, Drs,MA. "*Teori transformator*". Yogyakarta. Andi Offset (1991).
- [6] Turan Gönen, "*Electric power distribution system engineering*" McGraw-Hill,
Inc. N.Y. 1986.
- [7] ZUHAL, "*Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*". Jakarta,
PT. Gramedia Pustaka Utama. 2000.