

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Kualitas Daya Listrik

Perhatian terhadap kualitas daya listrik dewasa ini semakin meningkat seiring dengan peningkatan penggunaan energi listrik dan utilitas kelistrikan. Istilah kualitas daya listrik telah menjadi isu penting pada industri tenaga listrik sejak akhir 1980-an. Istilah kualitas daya listrik merupakan suatu konsep yang memberikan gambaran tentang baik atau buruknya mutu daya listrik akibat adanya beberapa jenis gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan (Dugan et al., 2004). Terdapat empat alasan utama, mengapa para ahli dan praktisi di bidang tenaga listrik memberikan perhatian lebih pada isu kualitas daya listrik (Dugan et al., 2004) yaitu :

1. Pertumbuhan beban-beban listrik dewasa ini bersifat lebih peka terhadap kualitas daya listrik seperti sistem kendali dengan berbasis pada mikroprosesor dan perangkat elektronika daya.
2. Meningkatnya perhatian yang ditekankan pada efisiensi sistem daya listrik secara menyeluruh, sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan penggunaan peralatan yang mempunyai efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan kapasitor untuk perbaikan faktor daya. Penggunaan peralatan – peralatan tersebut dapat mengakibatkan peningkatan terhadap tingkat harmonik pada sistem daya listrik, di mana para ahli merasa khawatir terhadap dampak harmonisa tersebut di masa

mendatang yang dapat menurunkan kemampuan dari sistem daya listrik itu sendiri.

3. Meningkatnya kesadaran bagi para pengguna energi listrik terhadap masalah kualitas daya listrik. Para pengguna utilitas kelistrikan menjadi lebih pandai dan bijaksana mengenai persoalan seperti interupsi, sags, dan peralihan transien dan merasa berkepentingan untuk meningkatkan kualitas distribusi daya listriknya
4. Sistem tenaga listrik yang saling berhubungan dalam suatu jaringan interkoneksi, di mana sistem tersebut memberikan suatu konsekuensi bahwa kegagalan dari setiap komponen dapat mengakibatkan kegagalan pada komponen lainnya.

Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan di distribusikan, dimana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listriknya. Penggunaan energi listrik yang jumlahnya banyak untuk kebutuhan operasional alat-alat listrik dapat dinilai dari tingkatan kualitas dan kuantitas dari energi listrik tersebut. oleh karena itu perusahaan penyedia energi listrik wajib memperhatikan dan memfokuskan pada permasalahan kualitas daya listrik yang bisa ditimbulkan agar para konsumen yang memerlukan energi listrik dapat memperoleh suplai daya listrik yang memadai baik dari segi kontinuitas serta kualitas pada tegangan yang menyuplai.

Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan, dan tidak dapat dikendalikan oleh arus listrik karena arus listrik

berada pada sisi beban yang bersifat individual, sehingga pada dasarnya kualitas daya adalah kualitas dari tegangan itu sendiri (Dugan et al., 2004)

2.1.1 Jenis-Jenis Permasalahan Kualitas Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik (Dugan et al., 2004). Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah:

1. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (*Long-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama lebih dari satu menit.
2. Ketidakseimbangan Tegangan adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
3. Harmonisa adalah gejala penyimpangan dari suatu gelombang (tegangan dan arus) dari bentuk idealnya berupa gelombang sinusoidal.
4. Fluktuasi Tegangan adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.
5. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik

2.1.2 Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang

Gejala perubahan tegangan durasi panjang memiliki waktu

penyimpangan terhadap frekuensi daya selama lebih dari 1 menit. Jenis dari gejala perubahan tegangan durasi panjang ada 3 (tiga), yaitu *sustained interruption*, *undervoltages*, dan *overvoltages*. Gejala perubahan tegangan durasi panjang umumnya berasal bukan dari kesalahan atau gangguan sistem, tetapi disebabkan oleh perubahan beban pada sistem dan pada saat pengoperasian pensaklaran sistem. Gejala perubahan tegangan durasi panjang biasanya ditampilkan sebagai grafik tegangan rms terhadap waktu (Dugan et al., 2004).

Pada saat tegangan suplai dari sebuah sistem tenaga menjadi nol untuk jangkawaktu lebih dari 1 menit, maka gejala perubahan tegangan ini disebut interupsi ataupemadaman berkelanjutan. Gangguan tegangan yang terjadi lebih dari 1 menit merupakan gangguan permanen yang membutuhkan campur tangan tenaga teknisi untuk memperbaiki sistem tenaga tersebut, agar kembali menjadi normal seperti sebelum terjadinya gangguan. Istilah pemadaman berkelanjutan (*sustained interruption*) mengacu pada fenomena yang terjadi sistem tenaga listrik tertentu dan secara umum tidak ada hubungannya dengan penggunaan istilah *Outage*. Istilah *outage* lebih menerangkan keluarnya komponen dari sistem tenaga listrik, dimana hal ini lebih berhubungan dengan keandalan dari suatu sistem tenaga listrik.

2.1.3 Undervoltages

Undervoltage adalah suatu gejala penurunan tegangan rms bolak-balik sebesar kurang dari 90 persen dari nilai tegangan nominal pada frekuensi daya untuk durasi lebih dari 1 menit. *Undervoltages* adalah hasil dari suatu peristiwa

kembalinya keadaan *overvoltage* menuju keadaan normalnya. Sebuah operasi pensaklaran beban atau pemutusan kapasitor bank dapat menyebabkan *undervoltage*, sampai keadaan dimana peralatan pengaturan tegangan pada sistem tegangan tersebut dapat membawa kembali pada toleransi nilai tegangan yang standar. Keadaan *overload* atau beban lebih pada rangkaian dapat mengakibatkan penurunan tegangan atau *undervoltages*.

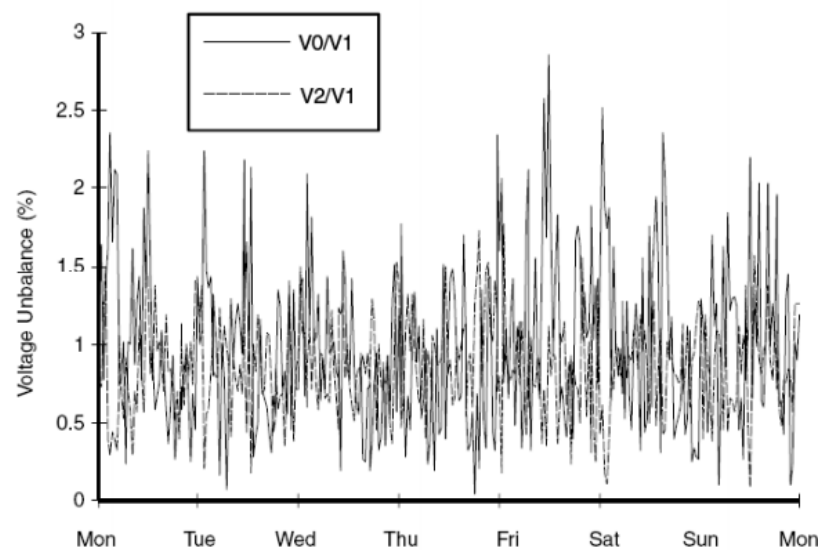
2.1.4 Overvoltages

Overvoltage atau tegangan lebih adalah suatu gejala peningkatan nilai tegangan rms bolak-balik sebesar lebih dari 110 persen pada frekuensi daya untuk waktu lebih dari 1 menit. *Overvoltages* biasanya akibat operasi pensaklaran beban (misalnya, switching dari sebuah beban besar atau kapasitor bank). *Overvoltage* dapat dihasilkan oleh terlalu lemahnya pengaturan tegangan yang dikehendaki terhadap sistem tenaga listrik tersebut atau kendali terhadap tegangan tidak memadai. Kesalahan pengaturan pada tap transformer juga dapat mengakibatkan tegangan lebih atau *overvoltages* pada sistem tenaga listrik

2.1.5 Ketidak-seimbangan Tegangan

Ketidak-seimbangan tegangan (*voltage imbalance* atau *voltage unbalance*) didefinisikan sebagai penyimpangan atau deviasi maksimum dari nilai rata-rata tegangan sistem tiga fase tegangan atau arus listrik dibagi dengan nilai rata-rata tegangan tiga fase atau arus tersebut, dan dinyatakan dalam persentase.

Ketidak- seimbangan dapat didefinisikan menggunakan komponen simetris. Rasio atau perbandingan nilai tegangan komponen urutan negatif atau urutan nol dengan nilai tegangan komponen urutan positif dapat digunakan untuk menentukan persentase ketidak-seimbangan (Dugan et al., 2004).



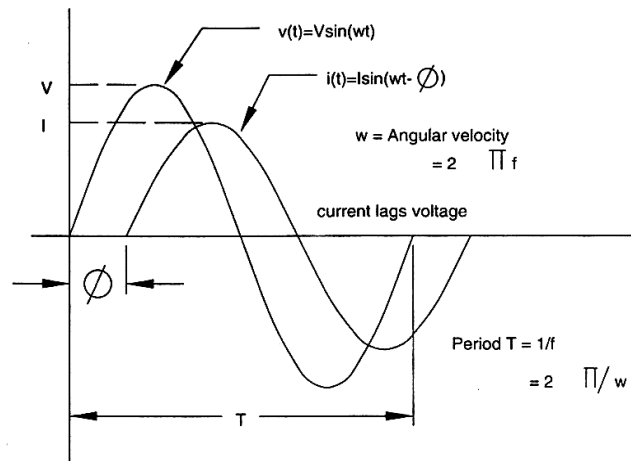
Gambar 2. 1 Ketidak-seimbangan Tegangan Pada Sistem Tenaga Perumahan

Gambar 2.1 menunjukkan contoh kedua buah perbandingan tersebut, yang menggambarkan ketidak-seimbangan tegangan selama 1 minggu yang terjadi pada saluran tenaga untuk perumahan.

Besarnya ketidak-seimbangan tegangan pada sumber utama tidak boleh lebih dari 2 persen. Nilai kritis dari keadaan ketidak-seimbangan tegangan adalah jika nilai persentase perbandingannya melebihi 5 persen, hal ini biasanya terjadi karena terputusnya salah satu fasa dari sistem tenaga listrik tiga fasa.

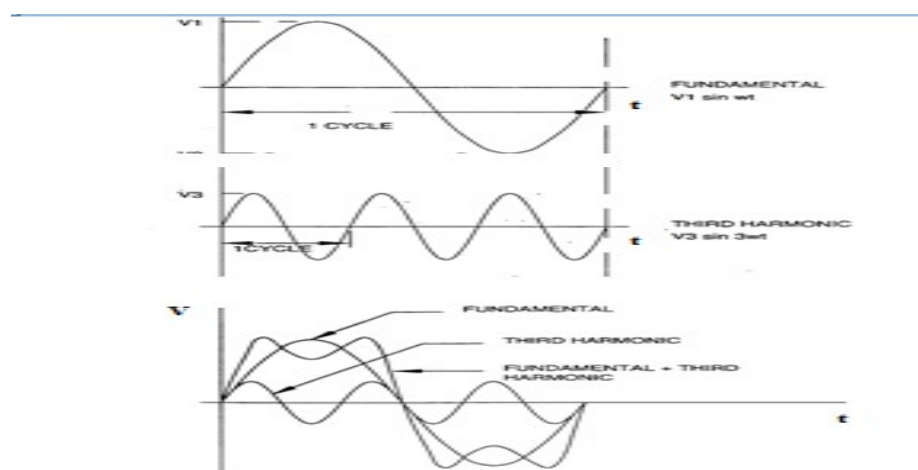
2.1.6 Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan..



Gambar 2. 2 Gelombang Sinus Arus Dan Tegangan

Gambar 2.2 menunjukkan distorsi gelombang arus sinus dan tegangan ini di sebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya



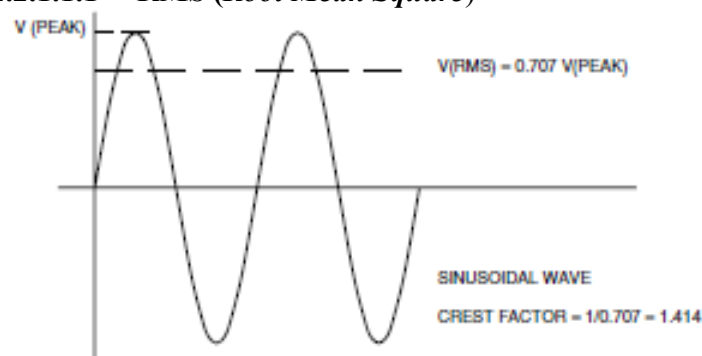
Gambar 2. 3 Gelombang Fundamental, Harmonik Ketiga, dan Hasil Penjumlahannya

Gelombang non-sinusoidal dapat terbentuk dengan menjumlahkan gelombang-gelombang sinusoidal. seperti pada gambar 2.3 Harmonisa disebabkan adanya beban-beban non-liner yang terhubung ke sistem distribusi (Sankaran, 2002). Beberapa contoh beban non liner antara lain: *variable speed drive*, komputer, printer, lampu *fluorescent* yang menggunakan elektronik ballast.

2.2.1.1 Indeks Harmonisa

Dalam pengukuran harmonik ada beberapa istilah penting yang harus dimengerti, yaitu *Root Mean Square*, *Individual Harmonic Distortion* dan *Total Harmonic Distortion* (RMS, IHD dan THD).

2.2.1.1.1 RMS (*Root Mean Square*)



Gambar 2. 4 Gelombang Sinusoidal Tegangan

Gambar 2. 4 adalah gelombang sinusoidal tegangan RMS dapat didefinisiakan sebagai akar kuadrat rata-rata dari fungsi yang terdapat amplitudo dari fungsi berkalanya pada suatu periode, sehingga RMS dapat diartikan sebagai persamaan berikut:

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk menghitung tegangan dan arus (V_{rms} dan I_{rms}) adalah:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_n^{\infty} V_n^2} \quad (2.2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_n^{\infty} I_n^2} \quad (2.3)$$

Atau dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.5)$$

1. IHD (Individual Harmonic Distortion)

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental. Rumus IHD adalah sebagaiberikut:

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{sn}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana:

IHD = Individual Harmonic Distortion

I_{sn} = Arus harmonisa pada orde ke- n (A)

I_{s1} = Arus fundamental (I_{rms}) (A)

2. THD (Total Harmonic Distortion)

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental. Nilai THD ini digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonik dari gelombang sinusoidal murninya. Untuk gelombang sinusoidal sempurna nilai THD-nya adalah 0%, sedangkan untuk menghitung THD dari arus dan tegangan yang mengalami distorsi adalah dengan menggunakan persamaan:

$$V_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dimana:

V_n = Nilai tegangan harmonisa (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

n = Komponen harmonik sistem yang diamati

$$I_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1}} \times 100\% \quad (2.8)$$

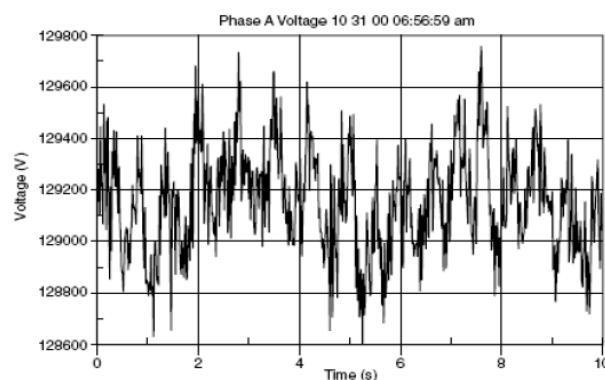
V_n = Nilai tegangan harmonisa (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

n = Komponen harmonik sistem yang diamati

2.1.7 Fluktuasi Tegangan

Fluktuasi tegangan adalah suatu perubahan tegangan yang sistematis atau serangkaian perubahan tegangan secara acak, dimana magnitud dari tegangan mempunyai nilai yang tidak semestinya, yaitu di luar rentang tegangan ditentukan oleh ANSI C84.1 sebesar 0,9 sampai 1,1 pu. Menurut IEC 61000-2-1 (IEC, 1990) salah satu fluktuasi tegangan, mempunyai karakteristik sebagai rangkaian tegangan acak yang berfluktuasi secara terus menerus. Beban yang berubah sangat cepat dan terjadi terus-menerus, dan menghasilkan arus beban yang besar dapat menyebabkan variasi tegangan yang sering disebut sebagai flicker atau kedip tegangan. Istilah *flicker* atau kedip tegangan berasal dari dampak adanya fluktuasi tegangan terhadap lampu, yang dianggap seperti mata manusia yang berkedip.



Gambar 2. 5 Fluktuasi Tegangan

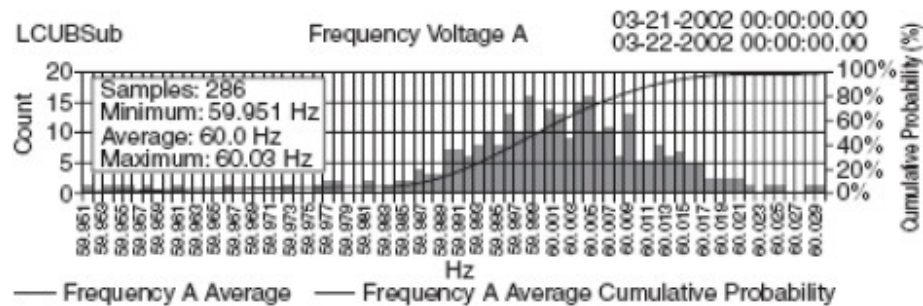
Gambar 2.5 adalah contoh dari gelombang tegangan yang menghasilkan flicker yang disebabkan oleh sebuah busur bunga api, salah satu faktor paling umum penyebab fluktuasi tegangan pada transmisi dan distribusi sistem tenaga listrik. Sinyal flicker didefinisikan dengan

besarnya rms tegangan dan dinyatakan sebagai persentase dari nilai dasarnya.

Flicker tegangan diukur dengan sensitivitas mata manusia. Biasanya, *flicker* yang besarnya lebih rendah 0.5 persen dapat menyebabkan lampu nampak berkedip, jika frekuensi berada dalam kisaran antara 6 sampai 8 Hz. IEC 61000-4-15 mendefinisikan suatu metodologi dan spesifikasi untuk mengukur flicker (IEC, 2010). IEEE mengadopsi standar yang berasal dari sistem tenaga 60 Hz yang digunakan di Amerika Utara. Standar ini secara sederhana menggambarkan potensi cahaya berkelip melalui pengukuran tegangan. Metode pengukuran tersebut mensimulasikan lampu/mata/otak sebagai transfer fungsi dan menghasilkan suatu metrik dasar yang disebut sensasi flicker jangka pendek.

2.1.8 Gejala Perubahan Frekuensi Daya

Gejala perubahan frekuensi daya didefinisikan sebagai penyimpangan frekuensi dasar sistem tenaga listrik dari nilai nominal tertentu (50 atau 60 Hz). Frekuensi sistem tenaga listrik secara langsung berkaitan dengan kecepatan putar generator yang mensuplai energi listrik ke sistem. Perubahan pada frekuensi merupakan suatu bentuk proses keseimbangan antara beban yang dinamis dan perubahan pembangkitan. Ukuran pergeseran frekuensi dan durasinya tergantung pada karakteristik beban dan tanggapan dari kontrol sistem pembangkit pada saat terjadi perubahan beban tersebut.



Gambar 2. 6 Perubahan Frekuensi Selama 24 Jam

Gambar 2.6 mengilustrasikan suatu variasi frekuensi untuk waktu 24 jam yang terjadi pada gardu induk 13 kV. Perubahan frekuensi yang terjadi pada pengoperasian sistem tenaga listrik dapat melebihi dari nilai batas-batas normal yang ditetapkan. Hal ini dapat disebabkan oleh gangguan hubung singkat pada sistem transmisi daya listrik, terputusnya kelompok beban yang mempunyai kapasitas besar, atau lepasnya suplai energi listrik dari suatu sistem pembangkitan yang besar.

2.2 Besaran Listrik Dasar

Terdapat tiga buah besaran listrik dasar yang digunakan didalam teknik tenaga listrik yaitu beda potensial atau sering disebut sebagai tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi. Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan didalam masalah-masalah sistem tenaga listrik. Selain ketiga besaran tersebut, masih terdapat satu faktor penting didalam pembahasan sistem tenaga listrik yaitu daya dan faktor daya.

2.2.1 Beda Potensial Listrik

Beda potensial listrik adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik. Beda potensial listrik merupakan ukuran beda potensial yang mampu membangkitkan medan listrik sehingga menyebabkan timbulnya arus listrik dalam sebuah konduktor listrik. Agar terjadi aliran muatan (arus listrik) dalam suatu rangkaian tertutup, maka harus ada beda potensial di kedua ujung rangkaian. Beda potensial listrik adalah energi tiap satuan muatan. Beda potensial listrik memiliki satuan Volt, simbol untuk beda potensial listrik adalah V , alat untuk mengukur beda potensial disebut Voltmeter. Beda potensial listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$V = \frac{W}{q} \quad (2.9)$$

Dimana:

V = Beda potensial (V)

W = Usaha yang diperlukan (J)

q = Muatan arus listrik (C)

2.3 Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konvensi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik diukur dalam satuan Ampere (A), adalah satu Coulomb per detik. Arus listrik dirumuskan:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.10)$$

2.4 Faktor Daya

Faktor daya yang rendah bisa disebabkan oleh peralatan listrik yang bersifat induktif, seperti motor-motor listrik dan ballast-ballast lampu.

$$f_{faktor\ daya} = \frac{P}{S} = \frac{V \times I \times \cos\varphi}{V \times I} = \cos\varphi \quad (2.11)$$

Sehingga:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

Nilai $\cos\varphi$ ditentukan oleh φ yang merupakan beda sudut antara V dan I . Perbedaan sudut V dan I ini dinamakan sudut impedansi, dimana tanda sudut impedansi menunjukkan sifat dari suatu beban yang ditunjukkan oleh $\tan\varphi = X/R$, yaitu perbandingan beban reaktif dengan beban resistif. Jika X_L adalah reaktansi induktif, maka sudut fasanya (φ) adalah positif, Sedangkan jika X_C adalah reaktansi kapasitif maka sudut fasanya ($-\varphi$) adalah negatif. Sudut φ positif maupun negatif tidak mempengaruhi harga $\cos\varphi$ karena $\cos\varphi = \cos(-\varphi)$, sehingga daya nyata selalu berharga positif, tetapi untuk $\sin\varphi$ berbeda dimana untuk sinus berlaku $\sin(-\varphi) = -\sin(\varphi)$ yang berharga negatif. Sehingga jika sudut impedansi positif maka $\sin\varphi$ berharga positif sehingga daya reaktif juga berharga positif yang berarti menunjukkan bebannya bersifat induktif, sedangkan jika sudut impedansi berharga negatif maka $\sin(-\varphi)$ juga berharga negatif sehingga daya reaktif juga berharga negatif. Jadi faktor daya ($\cos\varphi$) ditentukan oleh sifat beban yang harganya $0 - 1$.

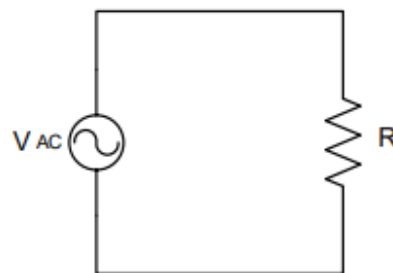
2.5 Sifat Beban

Menurut sifatnya beban listrik dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

1. Beban Resistif
2. Beban Induktif
3. Beban Kapasitif

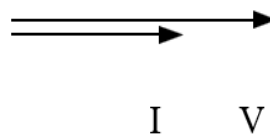
2.5.1 Beban Resistif

Impedansi yang bersifat resistif dapat terjadi pada impedansi yang terdiri dari beban resistif murni seperti gambar 2. 7



Gambar 2. 7 Rangkaian Beban Resistif

Keadaan resistif terjadi karena bagian imajiner dari impedansi berharga nol sehingga $Z = R$ seperti gambar 2.8

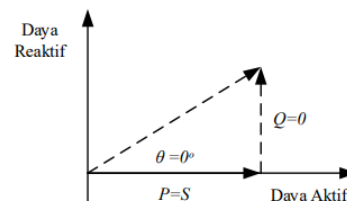


Gambar 2. 8 Vektor Tegangan Dan Arus Beban Resistif

Maka arus yang mengalir adalah:

$$I = \frac{V \angle 0^\circ}{R \angle 0^\circ} \quad (2.12)$$

$$I = I \angle 0^\circ \quad (2.13)$$



Gambar 2. 9 Vektor Segitiga Daya Beban Resistif

Apabila bebannya merupakan beban resistif, maka daya aktif akan sama dengan daya sebenarnya. Seperti gambar 2. 9

Maka daya aktif dapat diperoleh dengan persamaan:

$$P = V \times I \text{ (Watt)} \quad (2.14)$$

Daya reaktif dapat diperoleh dengan persamaan:

$$Q = 0 \text{ (VAR)} \quad (2.15)$$

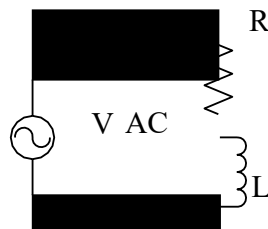
Daya semu dapat diperoleh dengan persamaan:

$$S = P = V \times I \text{ (VA)} \quad (2.16)$$

2.5.2 Beban Induktif

Perbedaan sudut fasa antara arus dan tegangan sebesar φ , dimana φ merupakan sudut impedansi yang menunjukkan sifat beban. Bila sudut impedansi berharga positif ($0^\circ < \varphi < 90^\circ$) maka beban bersifat induktif. Beban induktif

yang dipresentasikan oleh sebuah impedansi $Z \angle \varphi^\circ$, mempunyai sudut impedansi positif (φ positif), yang dicatu dengan sumber tegangan bolak-balik seperti pada gambar 2. 10



Gambar 2. 10 Rangkaian Beban Induktif

Harga impedansi beban induktif (Z) = $R + j \omega L$

Dimana:

$$\omega L = X_L \quad (2.17)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

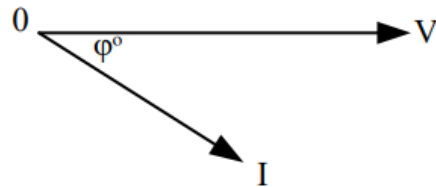
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

$$Z = |Z| \angle \varphi^\circ$$

$$I = \frac{|V| \angle 0^\circ}{|Z| \angle \varphi^\circ}$$

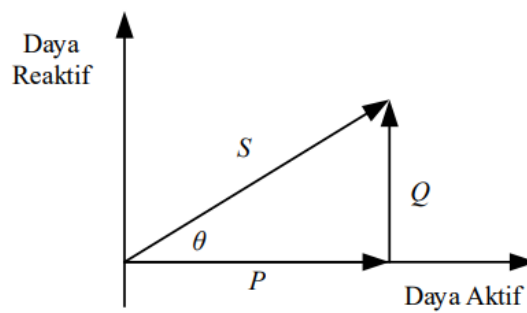
$$= |I| \angle \varphi^\circ (\text{Ampere})$$

Karena sudut impedansi berharga positif (beban induktif) maka sudut arus berharga negatif ($-\varphi$), sehingga gelombang arus tertinggal sebesar φ terhadap tegangan seperti gambar 2.11



Gambar 2. 11 Vektor Arus Dan Tegangan Beban Induktif

Apabila bebannya merupakan beban induktif, maka daya aktif tidak akan sama dengan daya semu. Seperti gambar 2. 12



Gambar 2. 12 Vektor Segitiga Daya Untuk Beban Induktif

Maka daya semu dapat diperoleh dengan persamaan:

$$S = V \times I \angle -\varphi$$

$$S = V \times I^* \quad (2.18)$$

$$S = V \times I \angle \varphi$$

$$S = V \times I(\cos\varphi + j\sin\varphi)$$

$$S = V \times I \cos\varphi + V \times I \times j\sin\varphi \quad (2.19)$$

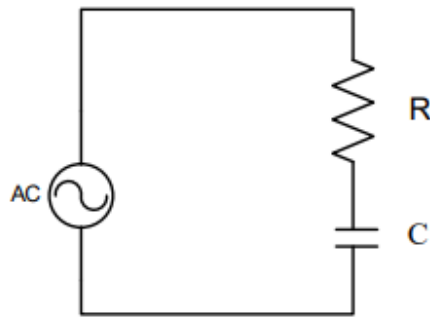
$$S = P + jQ \text{ (VA)} \quad (2.20)$$

Dimana:

S	=	Daya semu (VA)
P	=	Daya aktif (Watt)
Q	=	Daya reaktif (VAR)

2.5.3 Beban Kapasitif

Beban bersifat kapasitif yang dipresentasikan oleh sebuah impedansi $Z = R - jX_C$, mempunyai sudut impedansi negatif (beban kapasitif) yang dicatu oleh sumber tegangan bolak-balik seperti gambar 2. 13



Gambar 2. 13 Rangkaian Beban Kapasitif

Harga impedansi kapasitif:

Dimana:

$$Z = R - j \frac{1}{\omega C}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (-X_C)^2} \quad (2. 21)$$

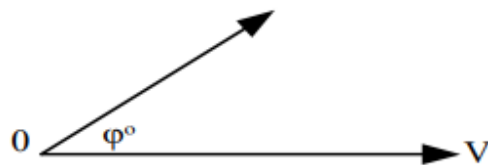
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(-X^C)}{R}$$

$$Z = |Z| \angle -\varphi^\circ$$

$$I = \frac{|V| \angle -0^\circ}{|Z| \angle -\varphi^\circ}$$

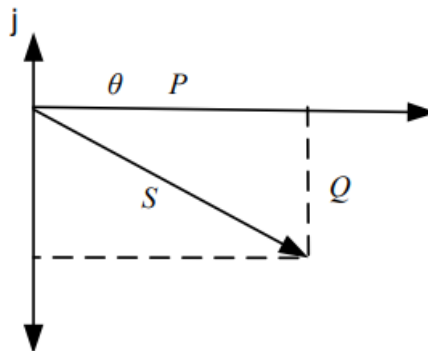
$$I = |I| \angle \varphi^\circ \quad (2.22)$$

Karena sudut impedansi berharga negatif (beban kapasitif) maka sudut fasa arus berharga positif (φ), sehingga gelombang arus mendahului gelombang tegangan sebesar φ . Maka hal ini bisa seperti gambar 2. 14



Gambar 2. 14 Vektor Tegangan Dan Arus Beban Kapasitif

Jika bebannya merupakan beban kapasitif, maka daya aktif tidak akan sama dengan daya yang sebenarnya seperti gambar 2. 15.



Gambar 2. 15 Segitiga Daya Untuk Beban Kapasitif

Maka daya aktif dapat diperoleh dengan persamaan:

$$S = V \times I \angle \varphi \quad (2.23)$$

$$S = V \times I^*$$

$$S = V \times I \angle -\varphi$$

$$S = V \times I (\cos\varphi - j\sin\varphi)$$

$$S = V \times I \cos\varphi - V \times j\sin\varphi$$

$$S = P - jQ(VA)$$

2.6 Standar Kualitas Daya

Menurut Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 04 Tahun 2009 tentang Aturan Distribusi Tenaga Listrik. Persyaratan Teknik Sistem Distribusi (Kementrian ESDM, 2009), semua titik sambung mengikuti persyaratan teknik sistem distribusi sebagai berikut:

1. Frekuensi nominal sistem adalah 50 Hz dan frekuensi normal mempunyai rentang antara 49.5 Hz sampai dengan 50.5 Hz.

2. Tegangan sistem distribusi harus dijaga pada batas – batas kondisi normal yaitu maksimal +5% dan minimal -10% dari tegangan nominal.

2.6.1 Tegangan

Sesuai dengan standard IEEE, 1159-2019 *Recommended For Monitoring Electric Power Quality* (IEEE, 2019), tegangan berlebih maksimum yang diijinkan adalah 5% tegangan nominal. Untuk under voltage, tegangan kurang minimum yang diijinkan adalah sebesar 10 % tegangan nominal.

2.6.2 Tegangan Tidak Seimbang

Berdasarkan standar (IEEE, 1159-2019) menjelaskan tentang rekomendasi untuk mementau kualitas tenaga listrik yang meyatakan nilai batas ketidakseimbangan tegangan (*Voltage Imbalance*) waktu keadaan listrik *steady state* adalah 0,5%- 5%.

2.6.3 Harmonisa

Standar harmonisa yang diijinkan untuk arus dan tegangan berdasarkan standar IEEE 519-2019 dapat dilihat dari tabel 2. 1 dan tabel 2. 2

Tabel 2. 1 Tabel Limit Distorsi Tegangan Harmonisa

MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORSION in % of fundamental						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	HARMONIS ORDER (ODD DISTORSION)					
	<	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$53 \leq$	TH

	11				h	D
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
EVEN HARMONICS are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L						
I_{sc} = Maximum short circuit current at PCC I_L = Maximum load current (fundamental frequency) at PCC						

Tabel 2. 2 Tabel Limit Distorsi Arus Harmonisa

HARMONIC VOLTAGE DISTORSION In% of fundamental			
	<69 kV	69-138 kV	>138 kV
Max.for individual Harmonic	3.0	1.5	1.0
Total Harmonic Distorsion (THD)	5.0	2.5	1.5

THD tegangan diukur pada PCC (*point of common coupling*) seperti yang disyaratkan oleh standard IEEE 519-2019. Untuk tegangan nominal di bawah 69 KV, THD tegangan tidak boleh melampaui 5%.