

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Kualitas Daya Listrik

Kualitas daya listrik dapat diartikan sebagai tolak ukur kemampuan pada sistem untuk memberikan kinerja daya listrik kepada pengguna sehingga peralatan listrik yang digunakan dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi dari peralatan tersebut secara berkelanjutan (Ronilaya 2008). 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. 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 ada kualitas dari tegangan itu sendiri (Andrei et al. 2017).

2.2. Jenis-Jenis Permasalahan Kualitas Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik (Andrei et al. 2017). Permasalahan kualitas daya listrik diantaranya :

2.2.1. Gejala Perubahan durasi Panjang

Gejala perubahan tegangan durasi panjang memiliki waktu penyimpangan terhadap frekuensi daya lebih dari satu menit. 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. Jenis ari gejala

perubahan tegangan durasi panjang ada 3 yaitu, *overvoltages*, *undervoltages*, dan *sustained interruption*.

a. Overvoltage

Overvoltages atau tegangan lebih adalah suatu gejala peningkatan nilai rms bolak-balik sebesar lebih dari 110 persen pada frekuensi daya untuk waktu lebih dari 1 menit. *Overvoltages* biasanya disebabkan oleh pelepasan beban (misalnya, pemutusan suatu beban besar), atau variasi kompensasi reaktif pada sistem (misalnya, beroperasinya kapasitor bank) (Andrei et al. 2017).

b. Undervoltage

Undervoltages adalah suatu gejala penurunan tegangan rms bolak-balik sebesar kurang dari 90% 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 memutuskan kapasitor bank dapat menyebabkan *undervoltage*, sampai keadaan dimana peralatan pengaturan tegangan pada sistem tegangan tersebut dapat membawa kembali pada toleransi nilai tegangan yang standar (Andrei et al. 2017).

c. Sustained Interruption

Pada saat tegangan suplai dari sebuah sistem tenaga menjadi nol untuk jangka waktu lebih dari 1 menit, maka gejala perubahan tegangan ini disebut interupsi atau pemadaman 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 (Andrei et al. 2017).

2.2.2. Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan (*voltage imbalance* atau *unbalance*) didefinisikan sebagai penyimpangan atau deviasi maksimum dari nilai rata-rata tegangan sistem tiga fasa tegangan atau arus listrik, dibagi dengan nilai rata-rata tegangan tiga fasa atau arus tersebut, dan dinyatakan dalam persen (Dugan et al., 2004). Ketidakseimbangan tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\% \text{ Unbalance Voltage} = 100\% \frac{\text{Maximum Voltage Deviation Average Voltage}}{\text{Average Voltage}} \quad (2.1)$$

Besarnya ketidakseimbangan tegangan pada sumber utama tidak boleh lebih dari 2%. Nilai kritis dari keadaan ketidakseimbangan tegangan adalah jika nilai persentase perbandingannya melebihi 5%, hal ini biasanya terjadi karena terputusnya salah satu fasa dari sistem tenaga listrik tiga fasa (Dugan et al., 2004).

Ketidakseimbangan dapat didefinisikan menggunakan komponen simetris. Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Satu kesatuan tiga fasor tegangan tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga fasa yang seimbang, yaitu (Sudaryatno Sudirham 2012).

a. Komponen urutan positif

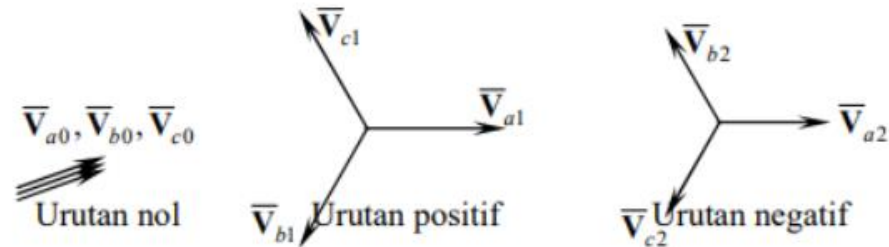
Komponen urutan positif adalah yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam beda fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.

b. Komponen urutan negatif

Komponen urutan negatif adalah tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lainnya dalam beda fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan arah dengan fasor aslinya.

c. Komponen urutan nol

Komponen urutan nol adalah tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.



Gambar 2. 1 Komponen Seimbang dari Tiga Fasor Tegangan Tiga Fasa
(Sudaryatno Sudirham 2012)

Gambar 2.1 menunjukkan komponen-komponen urutan positif pada V_a , V_b dan V_c adalah V_{a1} , V_{b1} dan V_{c1} . Komponen-komponen urutan negatifnya adalah V_{a2} , V_{b2} , V_{c2} . Sedangkan komponen-komponen urutan nolnya yaitu V_{a0} , V_{b0} dan V_{c0} . Semua faktor-faktor yang tidak seimbang adalah jumlah komponen-komponen aslinya dapat dinyatakan sebagai berikut ini:

$$\text{Tegangan fasa a, } V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.2)$$

$$\text{Tegangan fasa b, } V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2.3)$$

$$\text{Tegangan fasa c, } V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (2.4)$$

Pada komponen simetris terdapat operator a yang sesungguhnya adalah fasor satuan yang berbentuk

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (2.5)$$

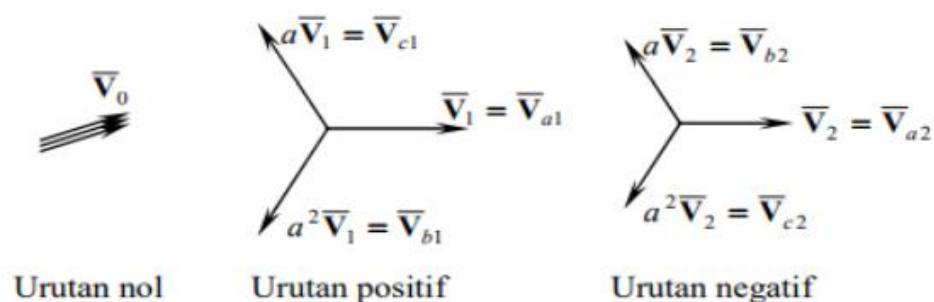
Suatu fasor, apabila dikalikan dengan a akan menjadi fasor lain yang terputar ke arah positif sebesar 120° dan jika kita kalikan dengan a^2 akan terputar ke arah positif 240° . Penggunaan operator a ini untuk menuliskan komponen urutan positif

dan negatif, dengan indeks a, b, c dapat dihilangkan karena arah fasor sudah dinyatakan oleh operator a, sehingga:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (2.6)$$

$$V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \quad (2.7)$$

$$V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2 \quad (2.8)$$



Gambar 2. 2 Komponen Urutan Dengan Menggunakan Operator a
(Sudaryatno Sudirham 2012)

Pada gambar 2.2 diketahui bahwa tiga himpunan fasor seimbang yang merupakan simetris dari tiga fasor tak-seimbang adalah V_{a1} , V_{b1} , dan V_{c1} . Demikian pula komponen urutan negative adalah V_{a2} , V_{b2} , dan V_{c2} , sedangkan komponen urutan-nol adalah V_{a0} , V_{b0} , dan V_{c0} . (Jalil and Zakri 2017)

2.2.3. Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya (Suryadi 2016).

Jika frekuensi pada 50Hz dikatakan frekuensi fundamental atau frekuensi dasar, maka jika gelombang tersebut mengalami distorsi kelipatan frekuensi dari frekuensi dasarnya, misalnya harmonik kedua (2f) pada 100Hz, ketiga (3f) pada 150Hz dan harmonisa ke- n memiliki frekuensi nf. Gelombang-gelombang ini menumpang pada gelombang frekuensi fundamentalnya dan terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni dengan gelombang harmonisa ke-3 (Suryadi 2016).

2.2.3.1. Induksi Harmonisa

Dalam pengukuran harmonik ada beberapa istilah penting yang harus dimengerti, yaitu :

a. IHD (Individual Harmonic Distortion)

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai rms dari harmonisa individual dan nilai rms dari fundamental yang digunakan untuk menggambarkan kontribusi setiap komponen harmonic terhadap harmonic arus dan tegangan (Nugroho and Reza 2018) Rumus IHD adalah sebagai berikut:

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{sn}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dimana:

IHD = *Individual Harmonic Distraction*

Isn = Arus harmonisa pada orde ke-n (Ampere)

Is1 = Arus fundamental (*Irms*) (A)

b. 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:

$$V_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1}} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dimana:

V_n = Nilai tegangan harmonisa (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

n = Komponen harmonik sistem yang diamati

$$I_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Dimana :

V_n = Nilai tegangan harmonisa (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

n = Komponen harmonik sistem yang diamati

2.3. 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.

2.3.1. Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah besarnya beda energi potensial antara dua buah titik dalam rangkaian yang diukur dalam satuan volt (V). Beda potensial listrik merupakan ukuran beda potensial yang mampu membangkitkan medan listrik sehingga menyebabkan timbulnya arus listrik dalam sebuah konduktor listrik (Sari 2020). Agar terjadi aliran muatan (arus listrik) dalam suatu rangkaian tertutup, maka harus ada beda potensial di kedua ujung rangkaian. 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 (Anwar et al., n.d.2021).

$$v = \frac{w}{q} \quad (2.12)$$

Dengan:

v : Beda Potensial (Volt)

w : Usaha yang Diperlukan (Joule)

q : Muatan Listrik (Coulomb)

2.3.2. Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai banyaknya muatan yang mengalir pada sebuah penghantar dalam waktu satu detik (*coulomb per second*) yang diukur dalam satuan ampere. Arus listrik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$i = \frac{q}{t} \quad (2.13)$$

Dengan:

i : Arus Listrik (Ampere)

q : Sejumlah Muatan (Coulomb)

t : Waktu (Detik)

2.3.3. Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang peristiwa dalam selang waktu yang diberikan. Satuan frekuensi dinyatakan dalam Hertz (Hz) yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, dimana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti rumus dibawah ini:

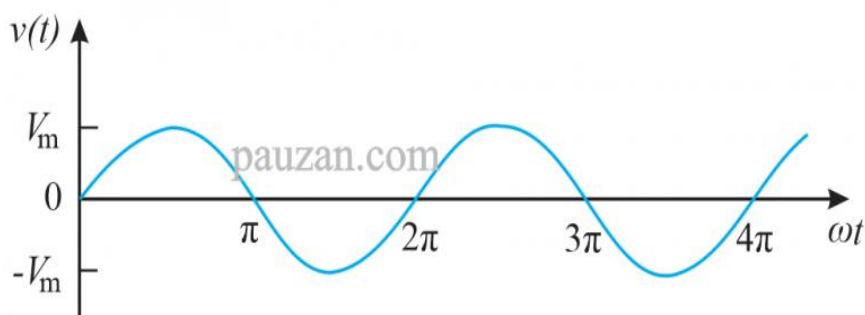
$$f = 1/T \quad (2.14)$$

Dengan:

f : Frekuensi (Hz)

T : Periode (Detik)

Di setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika berlaku frekuensi 60 Hz.



Gambar 2.3 Gelombang Sinusoidal

Gambar 2.3 menunjukkan gelombang sinusoidal tegangan sebagai fungsi waktu dan bentuk gelombang sinusoidal terjadi secara berulang. Frekuensi yang diperbolehkan adalah $\pm 1\%$ dari besarnya frekuensi dari referensi, yaitu 50 Hz untuk di Indonesia (Purwanto, Suyono, and Hasanah, n.d.2021)

2.3.4. Faktor Daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya nyata atau daya aktif yang disimbolkan dengan P dengan satuan Watt, dan daya Semu yang disimbolkan dengan S dengan satuan *Volt Ampere* (VA) (Dani and Hasanuddin 2018). Semakin tinggi faktor daya maka efektivitas dari alat-alat listrik akan semakin baik dan sebaliknya semakin rendah faktor daya berdampak pada rendahnya efektivitas dari alat-alat listrik, untuk menghitung faktor daya dirumuskan dengan

$$\cos\varphi = P/S \quad (2.15)$$

Dengan:

$\cos\varphi$: Faktor Daya

P : Daya Nyata (W)

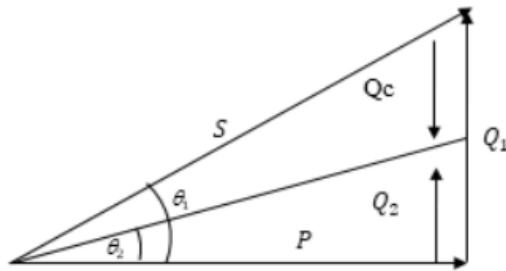
S : Daya Semu (VA)

Faktor daya sangat besar pengaruhnya terhadap kualitas dari sumber listrik dan kinerja dari alat-alat listrik. Akibat pemakaian kVAR yang tinggi menyebabkan pembentukan sudut faktor daya yang besar. Hasil dari melebarnya sudut daya tersebut berdampak pada rendahnya nilai faktor daya, kerugian-kerugian terhadap daya listrik dan menurunnya daya kerja efektif dari sumber listrik. Faktor daya yang lebih rendah dari $< 0,99$ atau $0,86$ (Yendi Esye 2021) menurunkan efisiensi kerja

alat daya listrik kerja (KW) tidak dapat bekerja secara optimal atau sebanding dengan daya yang tersedia.

2.3.5. Perbaikan Faktor Daya

Untuk merencanakan suatu sistem dalam memperbaiki faktor daya, dapat dipergunakan suatu konsep yaitu kompensasi kapasitor bank dengan cara perhitungan daya reaktif kompensator (Q_c) (Dani and Hasanuddin 2018). Untuk menghitung daya reaktif kompensator yang dibutuhkan, terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan, digunakan persamaan yang diperoleh dari gambar berikut ini:



Gambar 2. 4 Perbaikan Faktor Daya

(Dani and Hasanuddin 2018)

Gambar 2.4 menunjukkan perbaikan factor daya untuk komponen daya aktif dan daya reaktif akan diikuti dengan membesarnya daya semu (Wibowo et al. 2023)

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (2.16)$$

Dimana:

Q_c : Kapasitansi Kapasitor (VAR)

Q_1 : Daya reaktif awal (VAR)

Q_2 : Daya reaktif akhir (VAR)

Besarnya nilai daya Q_C kapasitor bank yang diperlukan untuk mengubah faktor daya dari $\cos\phi_1$ menjadi $\cos\phi_2$ dapat ditentukan dengan:

$$Q_C = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.17)$$

2.4. Beban Listrik

2.4.1. Beban Linier

Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linear, artinya arus mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier akan sama dengan bentuk gelombang tegangan (Said, Bone, and Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang 2020). Beberapa contoh beban linier adalah lampu pijar, motor sinkron, motor induksi kecepatan konstan, rice cooker, pemanas, dan setrika listrik.

2.4.2. Beban Non Linier

Beban non linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya atau dengan kata lain disebut distorsi tegangan dan arus listrik.. Dengan impedansinya yang tidak konstan, maka arus yang dihasilkan tidak berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan. Beban non linier yang umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor, dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan (Said, Bone, and Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang 2020). Beberapa contoh beban non linier adalah transformator, motor induksi, dan mesin las.

2.5. Standar Kualitas Daya Listrik

2.5.1. Standar Tegangan dan Frekuensi

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 04-0227-2003)(Monitasari et al. 2022) dan (SNI 04-1992-2002) yang menjelaskan tentang standar tegangan dan frekuensi yang menyatakan sebagai berikut:

1. Untuk tegangan dibatasi sampai dengan -10% dan +5% dari tegangan nominalnya.
2. Frekuensi nominal sistem adalah 50Hz

2.5.2. Standar Ketidakseimbangan Tegangan

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

2.5.3. Standar Harmonisa

Standar harmonisa berdasarkan (IEEE, 519-2014) (Cheng et al. 2014) menjelaskan tentang regulasi yang menyatakan nilai batasan distorsi harmonisa tegangan dan arus.

Total Harmonic Distortion (THD) diartikan sebagai presentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya (dapat berupa tegangan atau arus). Sedangkan untuk *Individual Harmonic Distortion* (IHD) merupakan rasio nilai RMS komponen harmonisa orde tertentu terhadap nilai RMS komponen fundamental.

1. Batasan Distorsi Harmonisa Tegangan

Batasan nilai yang direkomendasikan harmonisa tegangan akan diaplikasikan sesuai dengan *point of common coupling* (PCC) antara *owner* maupun *users* atau standar harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai. Dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Limit Distorsi Tegangan Harmonisa

Sumber: (IEEE 519-2014)

Bus voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total Harmonic Distortion (THD) (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Dari tabel 2.1 dapat diketahui bahwa standar THD tegangan berdasarkan standar IEE 519-2014. Standar ini dibuat dengan tujuan menentukan harmonisa agar tidak merusak kehandalan sistem dan mengatur tentang kualitas daya listrik. (Ramdipa Amerta, Rinas, and Janardana 2018)

2. Batasan Distorsi Harmonisa Arus

Untuk standar harmonisa arus, ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L . I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal.

Tabel 2.2 menunjukkan batasan nilai yang diizinkan harmonisa arus ini berlaku untuk pengguna yang terhubung ke sistem dimana tegangan pengenalan di *point of common coupling* (PCC) berada 120V hingga 69kV.

Tabel 2.2 Batas Maksimum Distorsi Harmonisa Arus

Sumber: (Cheng et al. 2014)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L							
Individual Harmonic Order (Odd Harmonic) ^{a,b}							
I_{SC}/I_L	$3 < h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	2.5	1.4	20.0

Dimana:

 I_{SC} : Max short circuit current di PCC (Point of Common Coupling I_L : Max load current (arus beban fundamental) di PCC

Catatan:

1. Batas maksimum distorsi harmonisa arus genap adalah 25% dari nilai pada tabel 2 diatas.
2. Angka dalam tabel berlaku untuk bilangan harmonisa (h) kelipatan dari frekuensi 50Hz.