

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kualitas Daya

International Electrotechnical Commission (IEC) mendefinisikan kualitas daya sebagai karakteristik listrik pada titik tertentu pada sistem kelistrikan, dievaluasi terhadap serangkaian referensi parameter teknis. Sedangkan *International Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) mendefinisikan kualitas daya sebagai konsep menghidupkan dan membumikan peralatan elektronik dengan cara yang sesuai dengan pengoperasian peralatan tersebut dan sesuai dengan sistem pengkabelan premis, dan peralatan lainnya yang terhubung, (Perera S & Elphick S, 2023).

Kualitas daya didefinisikan berdasarkan empat pengukuran parameter penting listrik, diantaranya adalah; tegangan, arus, frekuensi, dan fasa. Maka tegangan dan arus harus pada bentuk sinusoidal dengan besaran tertentu pada frekuensi konstan tanpa perubahan pada fasa, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

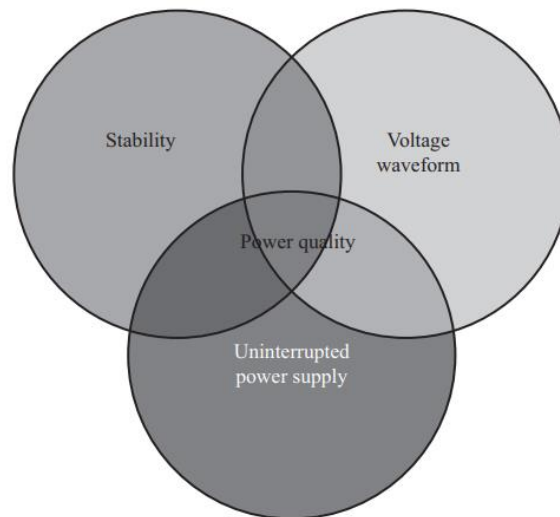
Secara sederhana, setiap deviasi dari bentuk gelombang sinusoidal tegangan dan frekuensi dianggap sebagai wujud dari gangguan kualitas daya. Kualitas daya mencakup berbagai fenomena yang dapat diamati dalam sistem tenaga. Dampak kualitas daya berkisar cukup relatif, dari tidak berbahaya hingga berbahaya. Dengan istilah bahwa fenomena kualitas daya sering disebut gangguan, (Perera S & Elphick S, 2023).

Gelombang sinus tegangan ideal dapat berasal dari generator, namun arus yang melewati impedansi sistem dapat menyebabkan beberapa gangguan pada bentuk gelombang ideal tegangan sinusoidal. Dengan adanya deviasi dari parameter ini, dapat dinyatakan sebagai kualitas daya yang rendah, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

2.2 Gangguan Kualitas Daya

Kualitas daya pada sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pada hal ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga aspek utama,

diantaranya adalah; stabilitas tegangan, catu daya yang tidak terputus, dan bentuk gelombang tegangan, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).



Gambar 2. 1 Tiga aspek utama kualitas daya
Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

Pada gambar 2.1 menunjukkan tiga aspek utama kualitas daya dengan pembagian stabilitas tegangan, koninuitas catu daya, dan bentuk gelombang tegangan. Rincian aspek pengaruh indeks kualitas daya dibahas pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Pengaruh indeks kualitas daya dalam berbagai aspek

Indeks Kualitas Daya	Stabilitas Tegangan	Kontinuitas Catu Daya	Bentuk Gekombang Tegangan
Harmonik	✓	×	✓
Interharmonik	×	×	✓
Ketidakseimbangan tegangan	✓	×	✓
Fluktuasi tegangan dan flicker	✓	×	✓
Frekuensi	✓	×	✓
Transien	✓	×	✓

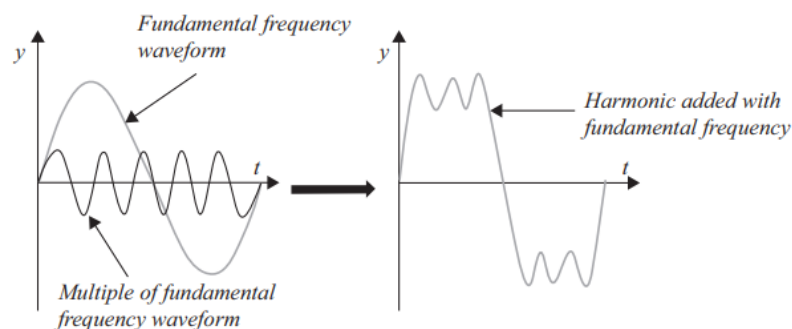
Indeks Kualitas Daya	Stabilitas Tegangan	Kontinuitas Catu Daya	Bentuk Gekombang Tegangan
<i>Sags, swell,</i> tegangan rendah, tegangan berlebih	✓	×	✓
Interupsi	×	✓	×

Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

2.3.1 Harmonik

Harmonik atau yang biasa disebut harmonisa merupakan tegangan sinusoidal atau arus dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi sistem tenaga (fundamental), umumnya nilai f adalah 50 atau 60Hz, (Fuchs E & Masoum M, 2023).

Ketika harmonik digabungkan dengan frekuensi dasar, hasilnya adalah bentuk gelombang yang terdistorsi. Harmonik mendistorsi tegangan atau bentuk arus murni untuk setiap siklus. Interaksi antara arus terdistorsi dengan impedansi jaringan adalah penyebab bentuk gelombang tegangan terdistorsi dan harmonik tegangan. Beberapa jenis peralatan seperti konverter elektronik daya akan menarik arus terdistorsi yang terdiri dari harmonik, (Perera S & Elphick S, 2023). Kerugian tambahan pada elemen pasif dan mesin-mesin rotasi akan mempengaruhi efisiensi motor dan menyebabkan harmonik pada tegangan dan arus, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).



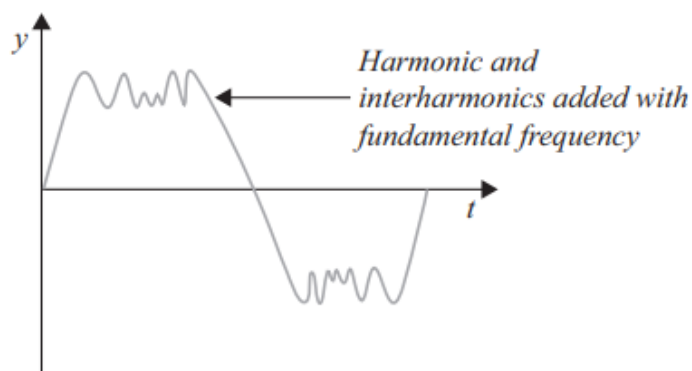
Gambar 2. 2 Harmonik dengan bentuk gelombang fundamental
 Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

Seperti yang ditampilkan pada gambar 2. 2 mengenai bentuk gelombang harmonisa daan gelombang fundamental. Dampak dari harmonisa arus adalah beban netral yang berlebih, terjadi *overheat* pada transformator, terjadi *trip* pada *circuit breaker*, dan kapasitor yang digunakn pada koreksi faktor daya. Sedangkan dampak dari harmonisa tegangan adalah distorsi bentuk gelombang tegangan, motor induksi, dan peningkatan harmonik arus, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

2.3.2 Interharmonik

Interharmonik dihasilkan antara frekuensi tegangan dan arus, dengan frekuensinya merupakan kelipatan non-integer dari frekuensi dasar. Sumber utama dari bentuk gelombang interharmonik adalah converter frekuensi statis, *cycloconverter* (memiliki ketidakseimbangan beban), konfigurasi ganda pada motor induksi, komputer. Interharmonik menyebabkan flicker, torsi frekuensi rendah, kenaikan suhu berlebih pada mesin induksi, dan tidak berfungsinya relai pelindung (dibawah frekuensi), (Fuchs E & Masoum M, 2023).

Dampak lainnya dari interharmonik tegangan adalah *overheating* pada peralatan, *overload* pada filter seri, dan saturasi pada transformator arus. Gambar 2. 3 menunjukkan non-integer dari frekuensi dasar disebut sebagai interharmonik, dan hal ini dapat muncul sebagai frekuensi diskrit. Baik harmonik dan interharmonik, ditampilkan secara bersama-sama dalam bentuk gelombang

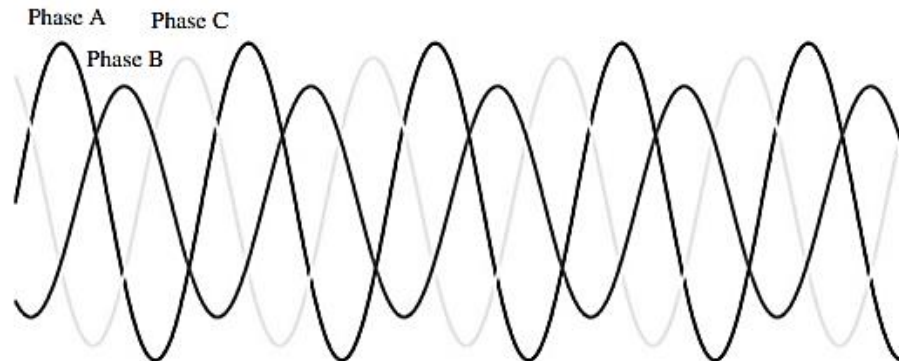


Gambar 2. 3 Gelombang fundamental harmonik dan interharmonik

Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

2.3.3 Ketidakseimbangan Tegangan

Dalam sistem tiga fasa, besar setiap tegangan fasa atau tegangan saluran memiliki besaran yang berbeda, dan sudut fasa juga berbeda dari sistem yang seimbang. Distribusi beban fasa tunggal yang tidak merata menjadi penyebab utama terjadinya ketidakseimbangan ini. Beban fasa tunggal yang terhubung ke pasokan tiga fasa akan menciptakan ketidakseimbangan tegangan di salah satu fasa. Selama ketidakseimbangan impedansi dari transmisi dan jaringan distribusi, converter daya elektronik AC/DC tiga fasa (penyearah diode tiga fasa) adalah ketidakseimbangan yang umum pada sistem dengan menarik arus sinusoidal dari pasokan AC utama. Rata-rata, beban industri dan beban domestik seperti beban penerangan merupakan fasa tunggal yang dipasok dari sistem tiga fasa. Beban fasa tunggal pada sistem tiga fasa menyebabkan kurang dari 2% beban mengalami ketidakseimbangan dan ketika lebih besar dari 5% dapat diakibatkan oleh kondisi pentahapan tunggal, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).



Gambar 2. 4 Ketidakseimbangan tegangan pada sistem tiga fasa

Sumber: (Perera S & Elphick S, 2023)

Gambar 2. 4 menampilkan bentuk gelombang dari ketidakseimbangan tegangan pada sistem tiga fasa. Dampak dari ketidakseimbangan ini terjadi ketika sebagian besar konverter daya dirancang untuk aplikasi loop tertutup di mana pulsa berasal dari tegangan output, baik pada DC dan AC sumber ketidakseimbangan, dan dapat menyebabkan adanya harmonik noncharacteristic (dihasilkan oleh perangkat semikonduktor daya dalam kondisi operasi normal). Selain itu, stabilitas sistem tenaga akan berkurang

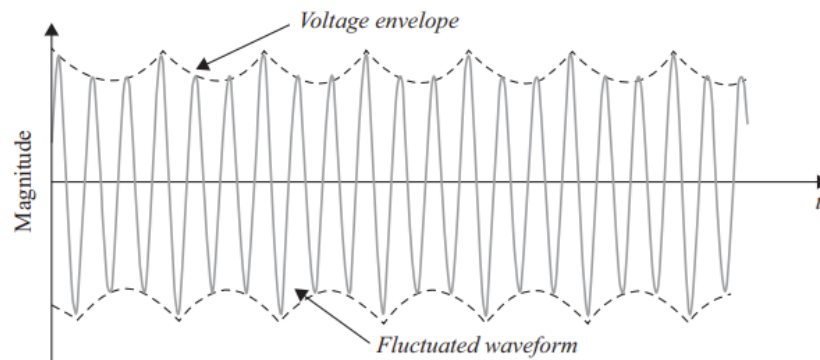
karena ketidakseimbangan tegangan pada jaringan dan menarik lebih banyak daya reaktif. Pada penggunaan instrument, pengoperasian instrumen yang tidak tepat dapat menyebabkan pengurangan masa pakai peralatan. Pada mesin listrik, ketidakseimbangan tegangan menyebabkan peningkatan kerugian dengan menarik arus yang tidak seimbang, dan menghasilkan pemanasan yang tidak merata dan menghasilkan torsi beresilasi pada motor.

2.3.4 Fluktuasi Tegangan dan *Flicker*

Fluktuasi tegangan dapat didefinisikan sebagai variasi periodik atau non-periodik dalam *envelope* tegangan karena perubahan yang tidak pasti dalam daya nyata dan reaktif oleh beban dengan batas yang diperbolehkan dari variasi sebesar 5% dalam tegangan nominal, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

Fluktuasi tegangan dan *flicker* sering dikelompokkan bersama, namun sebetulnya kedua hal ini tidak setara. Fluktuasi tegangan adalah perubahan cepat dalam besaran tegangan sementara *flicker* adalah modulasi amplitudo selubung bentuk gelombang tegangan. Secara sederhana, fluktuasi tegangan dapat dianggap sebagai sumber dan penyebab terjadinya *flicker*. Namun tidak semua fluktuasi tegangan menyebabkan *flicker* bermasalah. *Flicker* ini tidak boleh melebihi *short term flicker* (P_{st}) dengan batas hingga 1,0 dan *long term flicker* (P_{lt}) dengan batas 0,8.

Fluktuasi tegangan yang kurang dari 10% tidak memberikan dampak besar pada peralatan. Dampak utama fluktuasi tegangan dalam isolasi adalah peredupan lampu dan potensi terjadinya *trip* pada peralatan. IEC mendefinisikan flicker sebagai bentuk dari ketidakseimbangan sensasi visual yang diinduksi dari dorongan ringan yang pencahayaan istribusi spektralnya berfluktuasi seiring waktu. Pada Gambar 2. 5 menunjukkan visualisasi modulasi amplitudo periodik dari amplop bentuk gelombang tegangan yang merupakan akar penyebab flicker, (Perera S & Elphick S, 2023).



Gambar 2. 5 Fluktuasi tegangan pada beban

Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

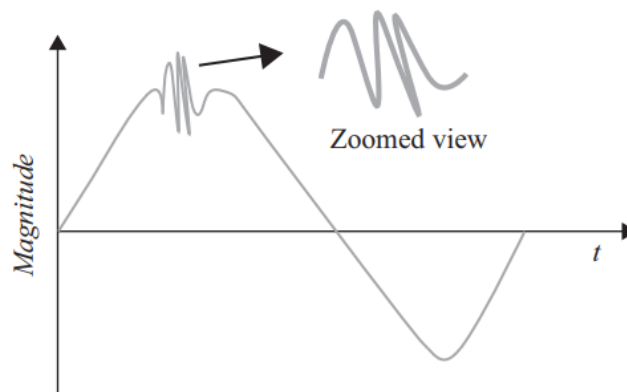
2.3.5 Variasi Frekuensi Daya

Deviasi pada frekuensi fundamental dari nilai yang telah ditentukan (50 atau 60Hz) jarang terjadi pada sistem listrik yang stabil. Deviasi frekuensi ini biasa terjadi pada jaringan sistem tenaga yang buruk, generator dengan keadaan *standby*, dan generator dengan muatan yang penuh karena terjadinya perubahan secara tiba-tiba pada beban. Ketidakseimbangan antara beban dan pembangkit juga dapat menyebabkan terjadinya variasi pada frekuensi daya. Perbedaan kecil pada frekuensi dapat menghasilkan torsi tinggi, dan hal ini menyebabkan kerusakan parah pada generator dan poros turbin. Selain itu pada sisi beban, motor bekerja secara efisien yang menyebabkan panas tambahan untuk meningkatkan arus, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

2.3.6 Transien

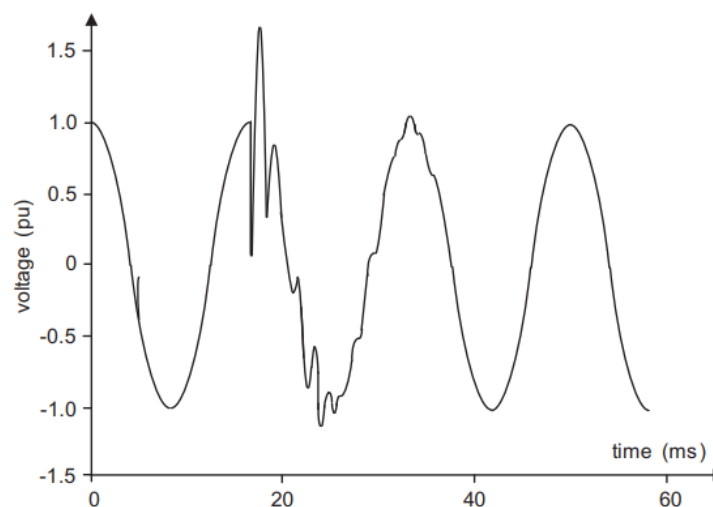
Transien pada kualitas daya dianggap sebagai peristiwa yang tidak pasti, karena terjadi dalam durasi yang sangat singkat dengan besarnya tegangan, arus, atau keduanya. Durasi transien hanya terjadi 1/1000 detik atau bahkan kurang dari 1 milidetik. Karakteristik dan bentuk gelombang transien ini tergantung pada mekanisme dan parameter jaringan (resistansi, induktansi, dan kapasitansi) pada titik tertentu. Transien ini biasa diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu impulsif dan osilasi. Transien impulsif umumnya disebabkan oleh petir (Gambar 2.6), sistem pentanahan yang buruk, kesalahan pada utilitas, atau masalah lainnya. Sedangkan transien osilasi biasanya disebabkan oleh berbagai penyebab pada sistem tenaga seperti *switching* alat, *switching*

kapasitor bank, energisasi beban dengan energisasi kapasitor bank (Gambar 2.7). Maka peralatan pelindung arus harus dapat bekerja secara cepat, (Perera S & Elphick S, 2023).



Gambar 2. 6 Arus transien impulsif yang disebabkan oleh petir

Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)



Gambar 2. 7 Transien osilasi frekuensi rendah yang disebabkan oleh energisasi kapasitor bank

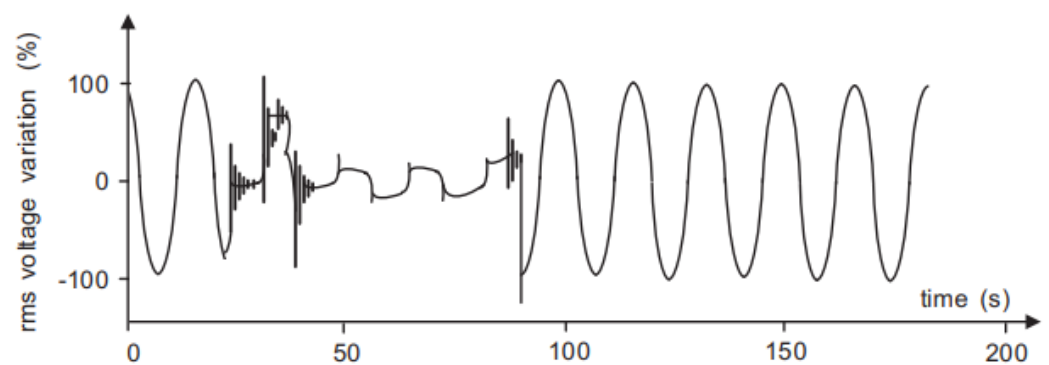
Sumber: (Fuchs E & Masoum M, 2023)

2.3.7 Variasi Tegangan Durasi Pendek

1. Sags

Voltage sags (dips) atau tegangan sag merupakan penurunan besaran tegangan efektif (rms) antara 0,1 sampai 0,9 pu. Siklus ini biasa terjadi

antara 0,5 dan 1 menit (durasi pendek). Tegangan sag ini diklasifikasikan menurut durasi menjadi sag seketika, sag sesaat, dan sag sementara. Penurunan tegangan ini biasanya disebabkan oleh pemberian beban yang terlalu berat, motor induksi yang besar, kesalahan pada *single line to ground* seperti pada Gambar 2. 8, dan transfer beban dari satu sumber daya ke sumber lainnya. *Sags* ini merupakan alasan utama kegagalan pada fungsi peralatan listrik tegangan rendah. *Uninterruptible power supply* (UPS) atau *power conditioner* biasa digunakan untuk mencegah penurunan tegangan ini.



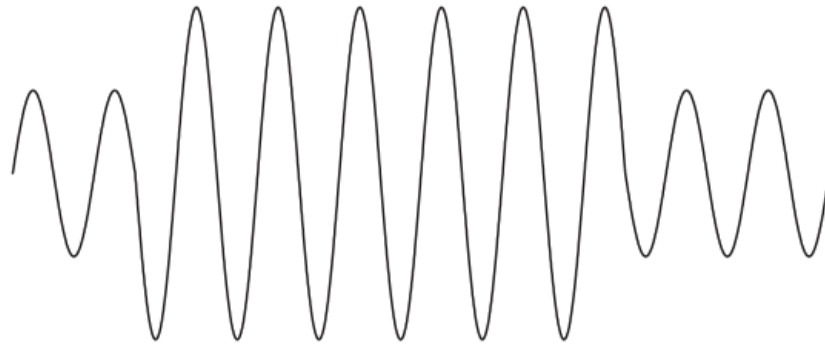
Gambar 2. 8 Tegangan sag disebabkan oleh *single line-to-ground* (SLG)

Sumber: (Fuchs E & Masoum M, 2023)

2. Swells

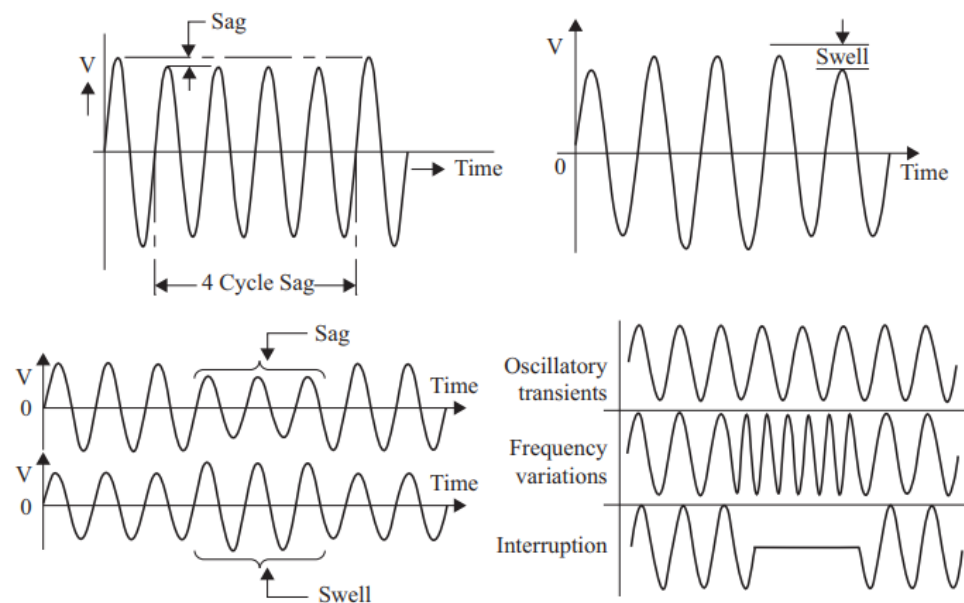
Voltage swells merupakan kondisi dimana terjadi kenaikan atau lonjakan sesaat tegangan rms. Secara sederhana, *voltage swells* dapat dianggap sebagai kebalikan dari *voltage sags*. Tidak ada definisi internasional yang menjelaskan secara konsisten mengenai besar tegangan atau periode waktunya. Menurut IEEE *swell* merupakan peningkatan tegangan rms di atas 1,1 pu untuk durasi dari siklus 0,5 hingga 1 menit. Sedangkan IEC mendefinisikan *swell* sebagai peningkatan sementara pada besar tegangan di suatu titik dalam sistem kelistrikan di atas batas. *Swells* umumnya disebabkan oleh penurunan beban yang terjadi secara tiba-tiba dan energisasi kapasitor bank. Terjadinya *swells* seperti pada gambar 2. 9 ini

dapat berdampak pada kerusakan catu daya, ketidakstabilan tegangan, kerusakan peralatan control, dan dampak lainnya. (Perera S & Elphick S, 2023)



Gambar 2. 9 Tegangan swell

Sumber: (Perera S & Elphick S, 2023)



Gambar 2. 10 Gangguan bentuk gelombang *sag*, *swell*, interupsi, variasi frekuensi, dan transien

Sumber: (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017)

Pada gambar 2. 10 menampilkan bentuk-bentuk perbandingan dari gelombang *sag*, *swells*, interupsi, variasi frekuensi, dan transien.

3. Tegangan rendah dan tegangan berlebih

Tegangan rendah atau *under voltage* merupakan kondisi dimana tegangan rms sistem lebih rendah dari yang diperlukan, yaitu 0,8 sampai 0,9 pu

selama 1 menit. *Under voltage* dapat disebabkan beban yang besar, sirkuit yang kelebihan beban, pengkabelan yang tidak tepat, dan tata pengkabelan yang sudah berkarat. Hal ini dapat berdampak pada ketidakstabilan tegangan, arus yang berlebih, permintaan daya reaktif yang tinggi, dan lainnya.

Sedangkan tegangan berlebih atau *over voltage* merupakan kondisi ketika terjadinya peningkatan tegangan rms yang lebih besar dari nilai yang diperlukan, yaitu 1,1 sampai 1,2 pu untuk periode lebih dari 1 menit. *Over voltage* disebabkan oleh pengurangan beban yang tidak terduga atau tiba-tiba, adanya resonansi, regulasi yang buruk tegangan pada sistem, kesalahan isolasi, transformator *tap charger*, atau petir. Terjadinya *over voltage* pada sistem dapat menyebabkan terjadinya trip pada peralatan, kerugian besar pada produksi di sebuah sektor industri, kerusakan peralatan, dan terjadi resiko pada stabilitas jaringan, (Zobaa & E Abdel Aleem, 2017).

2.3 Standar Kualitas Daya

Sebagian besar standar yang menentukan kualitas daya dibahas dan diproduksi oleh IEC atau IEEE, (Perera S & Elphick S, 2023). Adapun beberapa standar lain yang digunakan untuk parameter tertentu.

2.3.1 IEC

International Electrotechnical Commission (IEC) memiliki serangkaian standar kualitas daya dengan naungan *Electromagnetic Compatibility* (EMC) khususnya pada seri IEC 61000. Pada seri IEC 61000 diterbitkan sesuai dengan struktur berikut:

1. Umum: fundamental (prinsip dasar), definisi
2. Lingkungan: deskripsi dan klasifikasi lingkungan elektromagnetik, tingkat kompatibilitas
3. Batas: batas emisi dan kekebalan
4. Teknik pengujian dan pengukuran: contohnya untuk menilai kekebalan peralatan dan untuk menilai tingkat gangguan
5. Pedoman instalasi dan mitigasi

6. Standar umum: uprosedur umum untuk peralatan pengujian
7. Variasi (aneka ragam)

2.3.2 IEEE

Jika dibandingkan dengan IEC, standar IEEE ini cenderung mencakup lebih banyak tutorial atau informasi. Standar IEE yang mengatur harmonik terdapat pada IEEE 519, "*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*". Pada standar ini memberikan rekomendasi untuk pemantauan kualitas daya, (Perera S & Elphick S, 2023). Adapun seri pada standar IEEE yang memberikan panduan untuk manajemen kualitas daya, diantaranya sebagai berikut:

1. IEEE 142-2007, "*IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*" atau biasa dikenal sebagai *Green Book*.
2. IEEE 1100-2005, "*IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*" atau juga dikenal sebagai *Emerald Book*.
3. IEEE Std 446-1995 "*IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Systems for Industrial and Commercial Applications*" atau juga dikenal sebagai *Orange Book*.

2.3.3 SNI

Adapun standar yang membahas mengenai batasan tegangan. SNI 04-0227-2003 membahas mengenai batasan tegangan pada suatu instalasi listrik untuk jenis jenis bangunan yang berada di Indonesia. Pada standar tersebut menjelaskan beberapa hal, diantaranya:

1. Standar tegangan instalasi listrik

Tegangan standar untuk instalasi listrik rumah tangga adalah 220 V. Tegangan ini digunakan pada instalasi listrik di rumah, apartemen, dan gedung-gedung tingkat rendah. Sedangkan tegangan standar untuk instalasi listrik industri adalah 380 V. Tegangan ini digunakan pada instalasi listrik di pabrik, gudang, dan gedung-gedung tingkat tinggi. Standar ini bertujuan untuk memastikan keselamatan penggunaan listrik di rumah tangga maupun industri, karena ketika tegangan terlalu tinggi dapat

berbahaya jika tidak dipantau dengan baik. Selain itu, penggunaan standar ini juga bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan listrik. Tegangan yang tepat dapat mengurangi terjadinya rugi-rugi daya dan meningkatkan kualitas listrik.

2. Toleransi tegangan

Standar ini menyatakan bahwa toleransi tegangan dapat sebesar +5% dan -10% dari nilai tegangan nominal. Dapat dikatakan toleransi bisa 231V dan 198V dari tegangan nominal 220V.

3. Rentang tegangan instalasi listrik di Indonesia

Adapun rentang tegangan untuk instalasi listrik di Indonesia adalah untuk tegangan rendah (Low Voltage = LV): 50 V - 1000 V (1 kV), sedangkan tegangan menengah (Medium Voltage = MV): 1 kV - 35 kV.

2.3.4 EN

EN atau *European Norm* mengeluarkan standar untuk toleransi ketidakseimbangan tegangan, standar ditetapkan pada EN-50160. Toleransi maksimum yang ditetapkan adalah sebesar 2%, hal ini berlaku untuk tegangan rendah (*low voltage*) juga (*medium voltage*).

2.3.5 ANSI

ANSI atau *American National Standards Institute* telah mengeluarkan standar yang mengatur toleransi untuk ketidakseimbangan tegangan. Standar ditetapkan pada ANSI-C84.1-1995. Ketidakseimbangan arus maksimal ditetapkan si angka 5%, namun ketidakseimbangan arus dapat dikatakan baik apabila tidak lebih dari 20%. Standar ini bertujuan untuk memastikan keselamatan operasional.

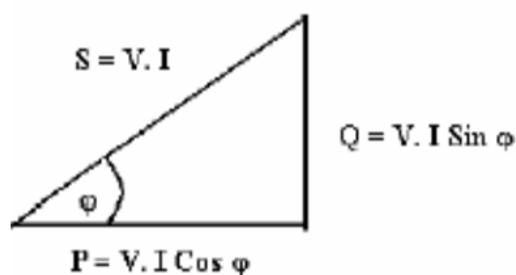
2.3.6 SPLN 70-1

Pada standar ini menetapkan bahwa besaran faktor daya adalah $\geq 0,85$.

2.4 Daya Listrik

Daya listrik merupakan tingkat konsumsi energi dalam suatu sirkuit atau rangkaian listrik dan menyatakan banyaknya energi listrik yang terpakai setiap

detiknya. Satuan dari daya listrik adalah Watt, (Setiaji dkk., t.t.). Daya listrik dapat menjadi pembeda antara beban dengan pembangkit listrik, dimana beban bersifat menyerap daya dan pembangkit listrik bersifat mengeluarkan daya. Berdasarkan kesepakatan universal, daya listrik yang mengalir dari rangkaian masuk ke komponen listrik bersifat positif, sementara daya listrik yang berasal dari komponen ke rangkaian listrik bersifat negatif. Daya listrik dibagi menjadi tiga jenis, yaitu daya aktif (P), daya reaktif(Q), dan daya semu(S), (Prarono dkk., t.t.). Pada sistem ketenagalistrikan terdapat segitiga daya (Gambar 2. 11) yang merujuk pada hubungan antara daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Berikut merupakan gambar dari segitiga daya listrik, (Ferdiansah dkk., 2023).



Gambar 2. 11 Segitiga daya listrik

Sumber: (Shavira dkk 2018)

2.4.1 Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang dibutuhkan beban dan biasanya daya aktif nilainya lebih rendah dibandingkan dengan daya semu. Dapat diartikan bahwa daya aktif merupakan energi yang sesungguhnya ditransmisikan atau dikonsumsi oleh beban. Daya aktif akan mengalami penurunan nilai yang diakibatkan adanya beban-beban listrik yang menghasilkan daya reaktif. Daya Aktif dihasilkan dari hasil perkalian Daya Semu dengan Faktor Daya ($\cos \phi$), (Setiaji dkk., t.t.). Daya aktif atau daya nyata, memiliki pengaruh terhadap beban dapat dirasakan secara nyata, seperti menyalanya lampu listrik (instalasi penerangan), adanya kopel (Torsi) yang dihasilkan oleh motor-motor listrik. Daya nyata diberi simbol P dalam satuan Watt, (Abdu dkk., 2018).

Untuk satu fasa, $P = V.I.\cos\varphi$(2. 1)

Untuk tiga fasa, $P = V.I.\cos\varphi.\sqrt{3}$(2. 2)

Dengan keterangan:

P = Daya aktif (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

Cos φ = Faktor Daya

2.4.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang timbul akibat adanya reaktansi pada sistem. Reaktansi dapat berupa reaktansi induktif atau reaktansi kapasitif. Contoh dari daya reaktif adalah pada motor, transformator, lampu pijar dan lain-lain. Daya reaktif memiliki efek berupa adanya fluksi magnet. Berbeda dengan daya aktif, daya reaktif merupakan hasil perkalian dari $VI\sin\varphi$ dan disimbolkan dengan Q, (Abdu dkk., 2018). Daya Reaktif dapat mengakibatkan terjadinya kerugian-kerugian daya, sehingga daya dapat mengakibatkan terjadinya penurunan nilai faktor daya (Cosphi). Satuan daya reaktif adalah VAR (Volt. Amper Reaktif). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif, (Setiaji dkk., t.t.).

Untuk satu fasa, $Q = V.I.\sin\varphi$(2. 3)

Untuk tiga fasa, $Q = V.I.\sin\varphi.\sqrt{3}$(2. 4)

Dengan keterangan:

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Sin φ = Besaran Vektor Daya

2.4.3 Daya Semu

Daya Semu dihasilkan dari perhitungan-perhitungan listrik sebelum dibebani dengan beban-beban listrik, dengan satuan VA (Volt.ampere). Beban dengan sifat daya semu merupakan beban yang bersifat resistansi (R). Peralatan

listrik atau beban dengan sifat resistansi tidak dapat dihemat, karena tegangan dan arus listrik memiliki nilai faktor daya 1, (Setiaji dkk., t.t.). Secara vektoris, daya semu merupakan hasil dari penjumlahan daya aktif dan daya reaktif. Hal ini dapat dilihat dengan jelas menggunakan segitiga daya. Daya semu merupakan nilai tenaga listrik yang melalui suatu penghantar, atau secara sederhana daya semu merupakan hasil dari perkalian tegangan dan arus yang melalui penghantar, (Abdu dkk., 2018).

$$\text{Untuk satu fasa, } S = V.I \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\text{Untuk tiga fasa, } S = V.I.\sqrt{3} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan keterangan:

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.5 Faktor Daya

Faktor daya yang atau biasa dikenal dengan $\cos \phi$ didefinisikan sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam rangkaian atau dapat dikatakan sebagai perbandingan daya aktif (W) dan daya semu (VA). Disisi lain, daya reaktif yang tinggi dapat menyebabkan terpengaruhnya faktor daya dengan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Umumnya faktor daya memiliki nilai yang berkisar antara 0 sampai 1. Namun dalam sistem tenaga listrik, terdapat tiga jenis faktor daya. Diantaranya adalah faktor daya unity, faktor daya terbelakang (lagging) dan faktor daya terdahulu (leading) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem, (*Purwarupa Monitoring Pengukuran Faktor Daya pada Jaringan Tegangan Rendah*, t.t.).

2.5.1 Faktor Daya Unity

Faktor daya *unity* merupakan kondisi dimana nilai $\cos \phi = 1$, dengan kondisi tegangan satu fasa dengan arus. Syarat dari terjadinya faktor daya *unity* ini adalah ketika beban bersifat resistif murni, sehingga beban

tersebut tidak menghasilkan pergeseran fasa arus maupun tegangan listrik jaringan. Gambar 2. 12 menunjukkan nilai $\cos\varphi = 1$, hal ini menyebabkan jumlah daya nyata yang dikonsumsi beban sama dengan daya semu, (*Purwarupa Monitoring Pengukuran Faktor Daya pada Jaringan Tegangan Rendah, t.t.*).

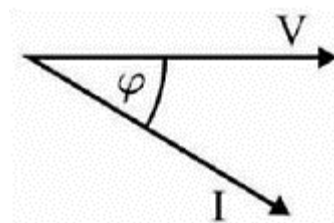


Gambar 2. 12 Arus satu fasa dengan V

Sumber: (Lisiani dkk 2020)

2.5.2 Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) merupakan keadaan dimana faktor daya memiliki kondisi beban atau peralatan memerlukan daya reaktif dari sistem beban atau beban bersifat induktif. Kondisi faktor daya terbelakang ini diartikan dari kondisi arus yang mengalami kondisi terbelakang atau tertinggal dari tegangan yang menyebabkan konsumsi daya reaktif oleh beban meningkat, maka bisa diartikan V mendahului I sudut φ , (*Purwarupa Monitoring Pengukuran Faktor Daya pada Jaringan Tegangan Rendah, t.t.*).



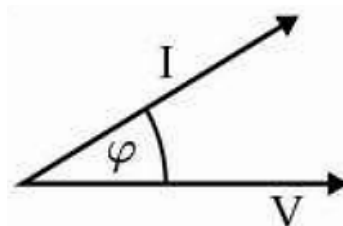
Gambar 2. 13 Arus tertinggal dari tegangan sebesar sudut φ

Sumber: (Lisiani dkk 2020)

Berdasarkan gambar 2.13, maka dapat terlihat bahwa arus tertinggal dari tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa daya reaktif mendahului daya semu dan dapat diartikan bahwa beban membutuhkan atau menerima daya reaktif dari sistem.

2.5.3 Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) merupakan kondisi faktor daya ketika beban atau peralatan memberikan daya reaktif dari sistem atau beban dengan sifat kapasitif. Kondisi faktor daya mendahului ini menggambarkan kondisi ketika arus mendahului tegangan, atau bisa diartikan ketika V terbelakang dari I dengan sudut φ , (*Purwarupa Monitoring Pengukuran Faktor Daya pada Jaringan Tegangan Rendah, t.t.*).



Gambar 2. 14 Arus mendahului tegangan sebesar sudut φ

Sumber: (Lisiani dkk 2020)

Dapat dilihat dari gambar 2.14 yang menunjukkan bahwa arus mendahului tegangan, artinya daya reaktif tertinggal dari daya semu maka sistem menerima daya reaktif dari beban. Ketika nilai PF lebih kecil dari 0,85 ($<0,85$) maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang. Hal ini akan mengakibatkan beberapa kendala dalam sistem tenaga listrik, seperti konsumsi daya reaktif (kVAR) membesar, tegangan jatuh (*voltage drops*) yang menyebabkan mutu listrik menjadi rendah, dan konsumsi daya aktif (kWH) membesar yang disebabkan oleh rugi-rugi.

2.6 Perbaikan Faktor Daya

Perbaikan faktor daya merupakan salah satu dari komponen atau kedua daya aktif dan reaktif akan diikuti dengan membesarnya daya semu. Faktor daya yang sering terjadi adalah faktor daya *lagging*, hal ini terjadi karena pemakaian beban induktif seperti motor atau trafo. Dengan membaiknya faktor daya ($\cos \varphi$) tidak hanya menguntungkan produsen energi listrik atau PLN, namun dapat dirasakan juga oleh konsumen karena manfaatnya dapat meliputi seluruh sistem mulai dari distribusi hingga ke beban, (Teguh Wibowo dkk., 2023). Untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan meningkatkan besaran nilai faktor daya

($\cos \phi$) menjadi nilai yang ideal yaitu mendekati satu (faktor daya *unity*). Hal ini dapat dilakukan dengan pemasangan daya reaktif tambahan berupa kapasitor bank, (Esye & Lesamana, 2021). Kapasitor memiliki sifat listrik yang kapasitif (*leading*), sehingga memiliki sifat yang dapat mengurangi atau menghilangkan sifat induktif (*lagging*), (Teguh Wibowo dkk., 2023).

Dalam menentukan kapasitansi kapasitor, terlebih dahulu dilakukan perhitungan daya reaktif kompensator (Q_c). Pada prinsipnya, dalam melakukan perbaikan faktor daya, sebuah kapasitor daya ac atau kapasitor bank harus memiliki nilai daya reaktif kompensator Q_c yang sama dengan nilai daya reaktif (Q) dari sistem yang akan diperbaiki faktor dayanya, maka dapat ditulis sebagai berikut, (Dani & Hasanuddin, 2018).

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \dots \dots \dots (2. 7)$$

Dalam menghitung daya reaktif kompensator yang dibutuhkan terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan, digunakan persamaan berikut, (Dani & Hasanuddin, 2018).

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots \dots \dots (2. 8)$$

Dengan:

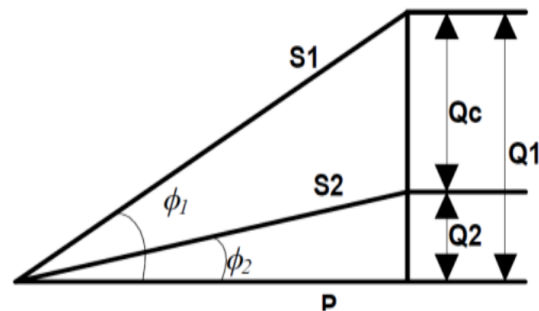
Q_c = Kapasitas Kapasitor (VAR)

Q_1 = Daya Reaktif Awal (VAR)

Q_2 = Daya Reaktif Akhir (VAR)

Menentukan besar nilai daya Q_c kapasitor bank yang diperlukan untuk mengubah faktor daya dari $\cos\phi_1$ menjadi $\cos\phi_2$ dapat ditentukan dengan persamaan berikut, (Dani & Hasanuddin, 2018).

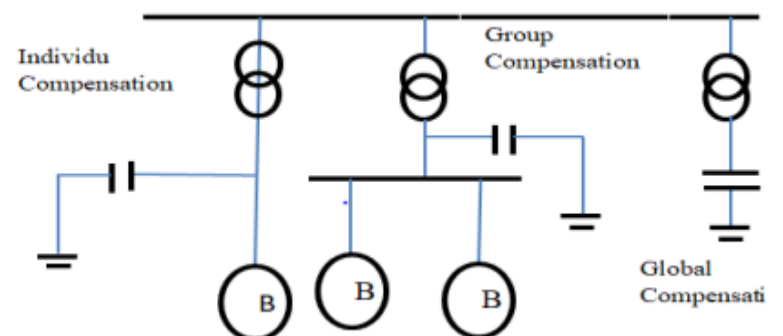
$$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \dots \dots \dots (2. 9)$$



Gambar 2. 15 Prinsip Perbaikan Faktor Daya

Sumber: (Dani & Hasanuddin, 2018)

Gambar 2. 15 menunjukkan prinsip dalam perbaikan faktor daya dengan menggunakan kapasitor bank. Kapasitor bank merupakan sekumpulan kapasitor yang disambungkan secara paralel untuk mendapatkan kapasitas kapasitif tertentu. Besaran yang digunakan adalah kVAR (kilo Volt Ampere Reaktif), walaupun didalamnya tercantum besaran kapasitansi yaitu farad atau microfarad. Adapun beberapa metode yang dapat dilakukan untuk penempatan dan pemasangan kapasitor bank terhadap beban, hal ini tergantung dari penggunaan kapasitor tersebut dan berapa nilai daya reaktif kompensator dari kapasitor bank yang diperlukan. Lokasi pemasangan kapasitor bank memiliki beberapa cara, namun terdapat tiga cara yang umum digunakan untuk pemasangan kapasitor bank, diantaranya adalah; *individual compensation*, *global compensation*, dan *group compensation*, (Teguh Wibowo dkk., 2023). Berikut contoh gambaran dari beberapa jenis cara pemasangan kapasitor bank, sesuai dengan gambar 2. 15.



Gambar 2. 16 Metode Penempatan Kapasitor Bank

Sumber: (Teguh Wibowo dkk., 2023)

Penggunaan kapasitor delta pada motor induksi dengan cincin geser dan starter tahanan atau starter langsung tidak bermasalah jika keluaran kapasitor tidak melebihi daya motor tanpa beban. Namun penggunaan starter delta-bintang dapat mengakibatkan masalah seperti tegangan lebih, arus buang, dan resonansi tinggi. Tegangan lebih ini dapat terjadi saat pemindahan dari bintang ke delta jika saluran fasa terputus sebelum saluran netral terputus. Untuk menghindari hal ini, dapat dengan penggunaan kapasitor enam kutub pada fase tunggal karena menghindari resonansi seri dan risiko eksitasi sendiri. Penggunaan kapasitor tiga kutub memiliki kecenderungan menyebabkan kenaikan resonansi dan tegangan lebih yang dapat merusak motor dan kapasitor, (Yani, 2017).

2.7 Resonansi Harmonisa

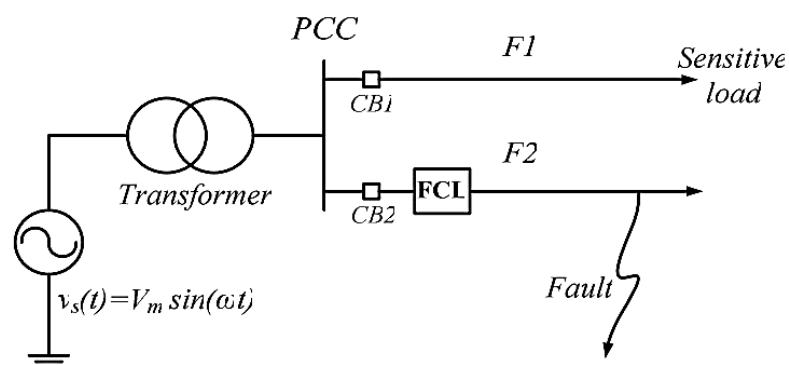
Resonansi merupakan frekuensi tinggi yang terjadi pada suatu rangkaian yang mengandung unsur induktif dan kapasitif yang menyebabkan reaktansi induktif dan kapasitif saling menghilangkan, sehingga didapat karakteristik rangkaian sebagai resistor murni. Efek distorsi gelombang sinusoidal (distorsi harmonisa) pada sistem menyebabkan terjadinya resonansi paralel maupun resonansi seri.

Adanya kapasitor pada jaringan sistem tegangan rendah yang biasanya dipakai untuk memperbaiki faktor daya dapat menimbulkan resonansi pada sistem lokal yang diikuti dengan naiknya arus yang sangat besar yang merugikan kapasitor itu sendiri, (Wayan Rinas, 2013). Terjadinya resonansi ini akan meningkatkan tegangan-tegangan harmonisa yang cukup besar pada bus kapasitor yang dapat merusak komponen jaringan lainnya, (Joslen dkk., 2020).

Adapun indeks harmonisa yang umum digunakan untuk menunjukkan kandungan harmonisa dari bentuk gelombang terdistorsi dengan satu angka, yaitu *Total Harmonic Distortion* (THD). Ini adalah ukuran nilai efektif komponen harmonik dari bentuk gelombang terdistorsi, yang didefinisikan sebagai rms harmonik yang dinyatakan dalam persentase fundamental, (Fuchs E

& Masoum M, 2023). Menurut IEEE 519-2022, (IEEE, 2022) THD adalah rasio dari *root-mean-square* harmonisa, dengan mempertimbangkan komponen harmonik hingga orde ke-50 dan secara khusus tidak termasuk interharmonik dan dinyatakan dalam presentase fundamental. Komponen harmonik dengan orde lebih besar dari 50 dapat dimasukkan bila diperlukan.

Standar tersebut mengatur dua syarat terkait harmonik, yaitu tingkat *Total Harmonic Distortion* (THD) maksimum yang pasti dan tingkat *Total Demand Distortion* (TDD) maksimum yang bervariasi. Semua pembatasan ini berlaku pada titik pertemuan umum (*Point of Common Coupling/PCC*), yang berfungsi sebagai penghubung antara penyedia layanan listrik (biasanya disebut operator) dan pelanggan. PCC dapat ditempatkan pada berbagai tingkat tegangan.



Gambar 2. 17 PCC Pada Sistem Tenaga Listrik

Sumber: (Jafari dkk., 2011)

Gambar 2. 16 menunjukkan contoh PCC pada suatu sistem tenaga listrik yang digambarkan pada *single line diagram*. Dalam beberapa situasi, PCC dianggap sebagai titik internal dalam sistem yang memiliki kepentingan khusus, hal ini berbeda dengan tujuan asal IEEE 519 yang hanya memandang PCC sebagai titik sambungan antara operator dan pelanggan, (IEEE, 2022). Berikut standar yang telah ditetapkan oleh IEEE 519-2022 yang mengatur batas distorsi tegangan:

Tabel 2. 2 Batas distorsi Tegangan

Tegangan bus V di PCC	Harmonik individu (%)	Total distorsi harmonik 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*

Sumber: (IEEE, 2022)

Dengan catatan, sistem tenaga tinggi diperbolehkan hingga 2,0% THD jika penyebabnya adalah terminal HVDC yang efeknya akan dilemahkan pada titik di jaringan dimana pengguna selanjutnya mungkin terhubung. Berikut ini adalah nilai efektif komponen harmonik dari bentuk gelombang terdistorsi, yang didefinisikan sebagai rms harmonik yang dinyatakan dalam persentase komponen fundamental (misalnya, arus) dapat didefinisikan sebagai berikut

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I^{(h)})^2}}{I^{(1)}} \dots\dots\dots(2. 10)$$

Adapun hubungan antara THD dan faktor daya yang dapat mempengaruhi nilai satu sama lain. Terjadinya harmonisa dalam sistem dapat menyebabkan penurunan pada faktor daya. Hal ini terjadi karena harmonisa meningkatkan arus yang mengalir dalam sistem yang tidak berguna untuk menghasilkan daya aktif, sedangkan sisanya berfungsi sebagai daya reaktif sehingga menyebabkan turunnya faktor daya (Bollen & Yu-Hua Gu, 2006).

Ketika THD meningkat, faktor daya akan cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan komponen harmonik dalam sistem yang mengarah pada peningkatan daya reaktif. Jika secara matematis, faktor daya bisa dihitung dengan memperhitungkan komponen harmonisa yang menunjukkan bahwa adanya harmonisa (THD tinggi) dapat menyebabkan turunnya faktor daya. (Bollen & Yu-Hua Gu, 2006).

$$PF_{THD} = \sqrt{\frac{1}{1+(THD)^2}} \dots\dots\dots(2. 11)$$

2.8 Penelitian Terkait

(Herrera & Salmerón, 2012) mengatakan bahwa Penyebab terjadinya harmonisa adalah karena adanya beban non-linear yang memperkenalkan distorsi ke dalam sistem listrik. Sedangkan (Attachie & Amuzuvi, 2013) mengatakan bahwa penyebab terjadinya harmonisa adalah adanya beban pada sistem listrik yang menghasilkan arus harmonik, yang dapat menyebabkan distorsi pada tegangan dan arus listrik serta gangguan pada sistem seperti *overheating* dan *malfunction* peralatan.

(Asadi dkk., 2021) mengatakan dalam kasus Pemasangan kapasitor untuk koreksi faktor daya dapat menyebabkan peningkatan distorsi harmonik tegangan dan arus, terutama di lingkungan yang kaya harmonik. Kapasitor, ketika dipasang di lingkungan seperti itu, menciptakan jalur impedansi rendah yang memperbesar besarnya harmonisa arus dan tegangan dalam suatu sistem, sehingga menghasilkan efek resonansi paralel. Dengan begitu, (Attachie & Amuzuvi, 2013) mengatakan bahwa Resonansi harmonik terjadi ketika kapasitor bank menyebabkan impedansi jaringan menjadi rendah pada frekuensi resonansi tertentu, yang mengakibatkan aliran arus yang tinggi melalui sirkuit impedansi yang rendah. Resonansi harmonik dapat menyebabkan gangguan seperti tripping dan kerusakan pada kapasitor bank, serta dapat menghasilkan arus dan tegangan yang tinggi. Resonansi harmonik juga dapat menyebabkan gangguan pada relay, PLC, dan menyebabkan kerugian keseluruhan pada sistem tenaga listrik.

Maka dari itu (Sharma & Mohan, 2018) mengatakan bahwa pemasangan bank kapasitor pada suatu jaringan distribusi dapat menyebabkan peningkatan harmonisa tegangan pada semua bus, kecuali bus yang kapasitor dan beban nonliniernya dihubungkan secara bersamaan. Algoritma Harmony Search (HS) digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran bank kapasitor yang optimal pada jaringan distribusi dengan terlebih dahulu mengidentifikasi lokasi bank berdasarkan Power Loss Index (PLI) pada bus kemudian menghitung kapasitas yang sesuai. bank menggunakan algoritma HS. Algoritme HS membantu

mengoptimalkan ukuran dan lokasi bank kapasitor dengan tujuan mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas tegangan dalam jaringan.