

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut ini merupakan beberapa referensi dari penelitian Analisis Profil Tegangan dan Arus pada Gedung Layanan Kesehatan, yang menjadi sumber dalam Tugas Akhir ini ada beberapa referensi yang digunakan yaitu :

Tri Novita Sari (2017) melakukan audit terhadap kualitas daya listrik blok A Gedung Keuangan Negara Yogyakarta, dan didapatkan hasil bahwa akibat adanya ketidak seimbangan beban dan pengaruh harmonik mengakibatkan terjadinya *losses* murni sebesar 2,087 kW, atau sebesar 8,06% dari total daya nyata yang digunakan. Jumlah total kerugian yang diakibatkan oleh ketidak seimbangan beban dan pengaruh harmonik yang harus dibayar sebesar Rp. 30.646.647,52 per- tahun.

Djodi Antono, Adi Wasono, Lukas Joko Dwi Atmanto (2015) melakukan penelitian terhadap harmonik arus dan tegangan pada jaringan listrik akibat pembebanan *Air Conditioning* (AC) inverter tiga fasa. Hasil yang diperoleh dari pengukuran dengan pebebanan AC inverter tiga fasa 6HP jenis VRV. diperoleh nilai THD arus sebesar 75,5 % sedangkan THD tegangan 4,7%.

Azhar Zahar Makmur (2012) melakukan penelitian terhadap Pembebanan Genset Di Kampus UMY. Hasil yang diperoleh yaitu wilayah B dengan beban puncak 473,29 KVA dan kapasitas genset sebesar 700 KVA mampu mencukupi apabila terjadi *off grid*. Wilayah Pasca dengan beban puncak 284,688 KVA dan kapasitas genset sebesar 680 KVA maka mampu mencukupi apabila terjadi *off grid*. Wilayah utara dengan beban puncak 595,531 KVA dan kapasitas genset 500 KVA maka tidak mampu untuk mencukupi apabila terjadi *off grid* pada saat beban puncak.

Syauqil Al Ghifari (2011) melakukan penelitian Audit Energi Listrik Di Rumah Sakit. Berdasarkan hasil pengukuran diketahui bahwa THD tegangan pada fasa R, S, dan T masih dalam kondisi bagus yaitu dibawah 5%. THD arus pada

panel MDP masih dalam keadaan baik karena dibawah standar IEEE No. 519-1992 yaitu sebesar 15%.

Hadi Sugiarto (2012) melakukan kajian terhadap harmonik arus dan tegangan listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri pontianak. Diperoleh hasil THD arus sebesar 10,6% dan masih berada pada batas standar yaitu 15%. Nilai THD tegangan sebesar 2,7% masih dibawah batas yaitu 5%. Namun ada ketidak seimbangan beban pada fasa T yang jumlahnya hampir dua kali fasa R, dan akibatnya terjadi arus pada kawat netral serta menimbulkan rugi-rugi daya pada kawat netral dengan nilai 2389 Watt.

Adha Rizky Juniawan, Wasimudin Surya S, Dadang Lukman Hakim (2014) melakukan perancangan dan pemasangan filter aktif 3 fasa untuk mereduksi harmonik yang diakibatkan oleh beban-beban *non-linear* di gedung TIK Universitas Pendidikan Indonesia. Nilai THD arus yang terukur sebelum dipasang filter aktif yaitu 84% dan melebihi batas standar IEEE 519-1992. Setelah dilakukan perancangan dan pemasangan filter aktif, diperoleh hasil nilai THD arus sebesar 5,12%. Jika dibandingkan dengan nilai THD arus sebelumnya, filter aktif ini cukup berhasil meredam harmonik.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kualitas Daya Listrik (*POWER QUALITY*)

Kualitas daya listrik merupakan sebuah konsep pada sistem tenaga listrik yang berkaitan mengenai mutu daya yang ada pada sistem. Kualitas daya listrik memberikan konsep mengenai baik atau buruknya kualitas dari tegangan, arus, dan frekuensi listrik. Ketiga hal tersebut merupakan parameter yang harus memenuhi standar acuan yang ada. Jika parameter tersebut tidak memenuhi standar, maka kualitas daya akan terganggu, sehingga dapat menimbulkan gangguan dan kerusakan pada peralatan listrik di sisi penyuplai maupun konsumen, selain itu juga dapat membahayakan terhadap keselamatan manusia.

Seiring dengan semakin banyaknya penggunaan terhadap energi listrik dan utilitas listrik, memberikan perhatian terhadap para ahli sistem tenaga

listrik untuk meningkatkan mutu dari daya listrik. Ada beberapa indikator yang dijadikan perhatian terhadap kualitas daya listrik saat ini (BPPT, 2014), yaitu:

1. Banyaknya penggunaan beban listrik yang sensitif terhadap kualitas daya listrik seperti peralatan berbasis elektronika daya dan sistem kendali.
2. Meningkatnya pemahaman dan kesadaran akan pentingnya penghematan energi dengan menggunakan peralatan yang memiliki efisiensi tinggi, seperti penggunaan lampu LED, AC inverter, penggunaan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya, dan kendali kecepatan motor listrik. Peralatan tersebut diklasifikasikan sebagai beban non-linear yang dapat menyebabkan peningkatan nilai harmonik pada sistem distribusi listrik. Efek dari harmonik ini dalam jangka panjang dapat mengakibatkan semakin menurunnya kualitas daya listrik dan kerusakan peralatan listrik.
3. Transmisi dan distribusi listrik yang saling terhubung menggunakan jaringan interkoneksi akan berakibat pada komponen jika terjadi suatu kegagalan atau gangguan dari komponen lainnya.

Dalam kualitas daya listrik ada beberapa hal yang dapat dijadikan sebagai tolak ukur baik atau tidaknya suatu daya yang disuplai pada suatu sistem tenaga listrik, yaitu:

1. Dapat memenuhi beban puncak.
2. Memiliki urutan fase yang benar.
3. Memiliki jaminan tegangan yang setimbang.
4. Memiliki deviasi tegangan dan frekuensi yang minimum
5. Menjamin distorsi gelombang tegangan dan distorsi harmonik yang minimal dan bebas dari surja tegangan.
6. Memberikan suplai daya yang memiliki keandalan tinggi dengan persentase pelayanan yang tinggi dimana beban dapat melayani beban secara efektif.

Parameter-parameter kualitas daya listrik pada kondisi steady steady state secara umum adalah sebagai berikut:

1. Tegangan (Volt)
2. Frekuensi (Hz)
3. Harmonisa
4. Faktor Daya (Cos phi)

2.2.2 Tegangan Listrik

“Tegangan Listrik adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan unit muatan listrik dari satu tempat ke tempat lainnya. Tegangan listrik yang dinyatakan dengan satuan Volt ini juga sering disebut dengan beda potensial listrik karena pada dasarnya tegangan listrik adalah ukuran perbedaan potensial antara dua titik dalam rangkaian listrik. Suatu benda dikatakan memiliki potensial listrik lebih tinggi daripada benda lain karena benda tersebut memiliki jumlah muatan positif yang lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah muatan positif pada benda lainnya. Sedangkan yang dimaksud dengan Potensial listrik itu sendiri adalah banyaknya muatan yang terdapat dalam suatu benda.

Tegangan listrik dapat juga dianggap sebagai gaya yang mendorong perpindahan elektron melalui konduktor dan semakin tinggi tegangannya semakin besar pula kemampuannya untuk mendorong elektron melalui rangkaian yang diberikan. Muatan listrik dapat kita analogikan sebagai air di dalam sebuah tangki air, sedangkan tegangan listrik dapat kita analogikan sebagai tekanan air pada sebuah tangki air, semakin tinggi tangki air di atas outlet semakin besar tekanan air karena lebih banyak energi yang dilepaskan. Demikian juga dengan tegangan listrik, semakin tinggi tegangan listriknya maka semakin besar energi potensial yang dikarenakan semakin banyak elektron yang dilepaskan.” (teknikelektronika.com).

Tegangan listrik untuk jaringan distribusi dibagi menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

2. Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyaluran dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V. Dengan 380 V merupakan besar tegangan antar fasa dan tegangan 220 V merupakan tegangan fasa –netral.

3. Tegangan Pelayanan

Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik untuk pelanggan pelanggannya. Di Indonesia besarnya tegangan pelayanan pada umumnya antara lain :

- a. 380/220 V tiga fasa empat kawat
- b. 220 V satu fasa dua kawat
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- e. 20 kV tiga fasa tiga kawat

2.2.3 Frekuensi

“Frekuensi secara umum dapat diartikan sebagai jumlah kemunculan suatu kejadian yang berulang pada suatu jangka waktu tertentu. Frekuensi didefinisikan sebagai “jumlah periode gelombang yang terjadi selama 1 detik”. Mengacu pada SI, satuan frekuensi adalah Hertz yaitu jumlah siklus per detik.

Nama ini diberikan sebagai penghargaan kepada Heinrich R. Hertz atas kontribusinya pada bidang gelombang elektromagnetik. Pada sistem tenaga listrik, istilah frekuensi diasosiasikan dengan frekuensi tegangan dan arus listrik. Frekuensi ini diperoleh dari kombinasi jumlah putaran dan jumlah kutub listrik pada generator di pembangkit listrik.

Amerika Utara, Westinghouse memilih mengoperasikan generator buaatannya pada 133 Hz, sementara Thompson-Houston (sebelum nanti namanya berubah menjadi General Electric) menggunakan generator yang beroperasi menghasilkan 125 Hz. Di Britania Raya, frekuensi sistem bervariasi mulai dari 83 Hz hingga 133 Hz. Frekuensi yang beroperasi di eropa daratan juga bervariasi mulai dari 30 Hz hingga 70 Hz. AEG dari Jerman menggunakan frekuensi 40 Hz untuk mentransmisikan listrik sejauh 175 km ke Frankfurt, MFO dari Swiss menggunakan frekuensi 50 Hz untuk mentransmisikan listrik ke pabriknya, sementara Ganz dari Hungaria menggunakan 42 Hz untuk melayani konsumen beban penerangannya. Standar peraturan menteri energi dan sumber daya mineral no.37 tahun 2008 nilai “frekuensi nominal 50 Hz, dan tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama waktu keadaan darurat (*emergency*) dan gangguan, frekuensi Sistem diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar dari operasi” (Permen ESDM no.37).

Begitu banyaknya frekuensi yang muncul menawarkan kelebihan dan kekurangan masing-masing, disamping juga mengakibatkan kebingungan tersendiri. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan untuk mendapatkan frekuensi yang paling tepat, sesuai dengan teknologi dan karakteristik sistem tenaga listrik jaman tersebut, diantaranya:

1. *Frekuensi yang tinggi dengan pertimbangan transformator*

Semakin tinggi frekuensi operasi maka ukuran transformator akan semakin kecil. Keuntungan menggunakan frekuensi yang lebih tinggi adalah biaya produksi transformator akan bisa menjadi lebih murah.

2. *Frekuensi yang rendah dengan pertimbangan turbin-generator*

Generator-generator pada masa tersebut umumnya diputar dengan menggunakan sabuk yang terhubung ke turbin, seperti pada generator Westinghouse yang menghasilkan frekuensi 133 Hz. Perkembangan selanjutnya adalah menghubungkan langsung turbin dengan generator pada 1 sumbu, namun dengan teknologi pada masa itu hanya bisa apabila putaran generator-turbin cukup rendah, artinya frekuensi listrik yang dihasilkan juga rendah.

3. *Frekuensi dengan pertimbangan lampu penerangan*

Beban utama yang dilayani sistem tenaga listrik pada saat itu adalah beban penerangan. Beban penerangan menuntut frekuensi sistem yang tidak rendah, karena akan mengakibatkan lampu yang berkedip-kedip. Frekuensi sistem harus tinggi supaya kedip pada lampu tidak lagi terasa oleh mata manusia.

4. *Perkembangan teknologi motor listrik*

Motor induksi mulai berkembang pada masa tersebut. Belum adanya teknologi pengaturan kecepatan motor mengakibatkan motor akan berputar proporsional dengan frekuensi sistem tenaga listrik yang ada. Produsen motor listrik pada umumnya adalah perusahaan yang juga membuat generator sehingga cenderung untuk memproduksi motor listrik yang sesuai dengan spesifikasi frekuensi generator yang diproduksinya sendiri, misalnya MFO dari Swiss dengan sistem 50 Hz. Apabila kita ingin menggunakan motor listrik tersebut, tentu saja kita harus menyediakan sistem tenaga yang sesuai dengan spesifikasi frekuensi motor tersebut.

Kompromi menjadi jalan tengah untuk mendapatkan frekuensi terbaik dari sekian banyak persyaratan yang saling berlawanan tersebut. Angka kompromi yang muncul pada masa itu adalah frekuensi pada kisaran 50 – 60 Hz. Angka tersebut cukup rendah untuk teknologi pembangkitan, cukup tinggi untuk mendapatkan transformator yang sesuai, dan cukup tinggi

supaya kedip pada lampu penerangan tidak terasa. Apabila suatu daerah ingin digabungkan melalui interkoneksi, frekuensi yang dipilih harus sama dengan frekuensi yang sudah ada sebelumnya yaitu 50 Hz atau 60 Hz.”(Herman-salim)

2.2.4 Jatuh Tegangan (*drop tegangan*)

“Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti. “Standar ANSI C84.1 – 1995 ketidak-seimbangan tegangan sistem tidak boleh melebihi 3% pada saat tidak dibebani, dan maksimal 6% untuk sistem yang dibebani”.(ANSI C84.1-1995)

Jatuh tegangan secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Jatuh tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh tegangan (ΔV) pada penghantar semakin besar jika arus (I) didalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar ($R\ell$) semakin besar pula. Jatuh tegangan merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada dibawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka jatuh tegangan yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya. Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan

jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan VR (voltage regulation) dan dinyatakan oleh rumus:"

$$Vr = \left(\frac{Vs - Vr}{Vr} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

Vr: Regulasi Tegangan

Vs: Tegangan sisi pengirim/Tegangan sumber

Vr: Tegangan sisi penerima/Tegangan penerima

2.2.5 Losses

Pengertian *Losses* yaitu sejumlah energi yang hilang dalam proses pengaliran energi listrik mulai dari Gardu Induk sampai dengan konsumen. Penyebab timbulnya *losses* yaitu: Panjang penghantar, kecilnya ukuran penampang penghantar, sambungan penghantar yang kurang baik, dan arus yang mengalir terlalu besar. Untuk mengetahui nilai *losses* dapat dihitung menggunakan rumus:

2.2.5.1 Power Losses Total

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_R + \Delta P_S + \Delta P_T + \Delta P_N \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

ΔP_{Total} = Power Losses Total

ΔP_R = Power Losses Fasa R

ΔP_S = Power Losses Fasa S

ΔP_T = Power Losses Fasa T

ΔP_N = Power Losses Netral

Untuk mencari power *losses* pada fasa R, Fasa S, Fasa T, dan Netral dapat digunakan persamaan:

2.2.5.2 Power Losses Fasa R

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I k_R^2 (W) \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

ΔP_R = Power Losses Fasa R

ΔP_R = Hambatan Kabel Fasa R

$I k_R^2$ = Besar Arus Harmonik pada Fasa R tiap orde

2.2.5.3 Power Losses Fasa S

$$\Delta P_S = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I k_S^2 (W) \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

ΔP_S = Power Losses Fasa S

ΔP_S = Hambatan Kabel Fasa S

$I k_S^2$ = Besar Arus Harmonik pada Fasa S tiap orde

2.2.5.4 Power Losses Fasa T

$$\Delta P_T = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I k_T^2 (W) \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

ΔP_T = Power Losses Fasa T

ΔP_T = Hambatan Kabel Fasa T

$I k_T^2$ = Besar Arus Harmonik pada Fasa T tiap orde

2.2.5.5 Power Losses Fasa Netral

$$\Delta P_N = \sum_{k=1}^n R_{ph} \times I_{kN}^2 (W) \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

ΔP_N = Power *Losses* Fasa N

R_{ph} = Hambatan Kabel Fasa N

I_{kN}^2 = Besar Arus Harmonik pada Fasa N tiap orde

“Usaha untuk memperkecil rugi-rugi pada sistem distribusi tenaga listrik antara lain: memilih ukuran penghantar, jenis penghantar yang sesuai untuk digunakan pada kondisi pembebanan jaringan tersebut dan sesuai dengan kemampuan hantar arus memperpendek jarak lintas jaringan, mengatur letak-letak beban sehingga jatuh tegangan pada titik-titik percabangan ke beban masih dalam batas yang diijinkan (untuk sistem 20KV, batas tegangan jatuh yang diijinkan pada kondisi beban penuh sebesar 4% untuk jaringan tegangan rendah) (SPLN 1978), pemilihan penggunaan trafo distribusi yang sesuai dengan kondisi faktor beban pada lokasi yang dilayani, pemilihan kapasitas trafo distribusi pada suatu lokasi beban, biasanya berdasarkan besar beban yang akan dilayani serta pertimbangan kemungkinan penambahan (perluasan) pada lokasi yang bersangkutan. Dalam hubungannya untuk menjaga agar tegangan jatuh yang terjadi sampai pada konsumen sekecil mungkin, kapasitas trafo yang digunakan harus lebih besar dari kapasitas beban yang dilayani, sedangkan pemilihan lokasi penempatan dari trafo distribusi tidak terlalu jauh dengan masing-masing beban yang terpasang pada GTT tersebut sehingga tegangan yang jatuh pada konsumen dapat sekecil mungkin. Pemilihan tegangan pada jaringan ditentukan oleh besarnya beban dan jarak penyaluran dayanya.”(cor-ding14 losses)

2.2.6 Faktor Daya

Merupakan cosinus sudut yang dihasilkan dari perbandingan nilai daya aktif (P) dengan daya semu (S). Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
\text{Faktor daya (Pf)} &= \frac{\text{Daya aktif (P)}}{\text{Daya semu (S)}} \\
&= \frac{kW}{kVA} \\
&= \frac{V \times I \times \cos \varphi}{V \times I} \\
&= \cos \varphi
\end{aligned}$$

PT. PLN (persero) selaku penyedia daya listrik memberikan batasan terhadap faktor daya, untuk bangunan gedung diberi batas sebesar 0.85. jika faktor daya rata-rata dibawah angka tersebut maka dikenakan denda Penalti oleh PLN. Penyebab faktor daya rendah pada suatu sistem jaringan listrik adalah beban induktif. Pada suatu rangkaian induktif murni, arus akan tertinggal sebesar 90^0 terhadap tegangan, perbedaan sudut fase ini yang akan menyebabkan faktor daya untuk mendekati nol. Beban-beban listrik yang menyebabkan rendahnya faktor daya antara lain motor induksi, unit-unit *ballast* dari lampu, dan alat-alat las busur listrik.

Efek lain yang ditimbulkan oleh rendahnya faktor daya selain terkena penalti dari penyedia layanan listrik (PLN) jika dibawah batas, yaitu

1. Mengalami kerugian daya pada jalur penghantar, karena pada sebuah penghantar, kerugian yang timbul akibat arus yang mengalir adalah berbanding lurus dengan nilai arusnya (I^2). Jika suatu penghantar dialiri arus semakin besar, maka akan semakin besar pula *losses* pada jaringan tersebut.
2. Ukuran penghantar harus lebih besar karena ketika faktor daya rendah, arus yang mengalir akan meningkat, dengan demikian untuk mengalirkan arus yang besar diperlukan kabel yang memiliki luas penampang yang semakin besar, dan biaya yang dibutuhkan besar.
3. Mengakibatkan efisiensi rendah. Hal ini karena jika faktor daya rendah akan mengakibatkan drop tegangan yang cukup besar dan kerugian disepanjang penghantar.

Faktor daya yang ditetapkan oleh PLN untuk industry minimal 0.85 agar tidak dibebani biaya tambahan . Bagi industri apabila faktor daya lebih rendah dari 0.85 maka akan dikenakan denda, sedangkan pada rumah tangga tidak dikenakan denda hanya saja biaya pajak listrik bulanan lebih mahal. Semakin rendahnya faktor daya maka semakin besar biaya yang dibebankan kepada pelanggan yang dihitung dari besarnya daya reaktif (Q) dalam sebuah (kvarh). Hubungan antara daya aktif, daya semu, dan daya reaktif dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

2.2.6.1 Daya Aktif (P)

Perhitungan listrik satu fasa

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.7)$$

Perhitungan listrik tiga fasa

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.8)$$

2.2.6.2 Daya Semu (S)

$$S = V \times I \dots\dots\dots(2.9)$$

2.2.6.3 Daya Reaktif (Q)

Perhitungan listrik satu fasa

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.10)$$

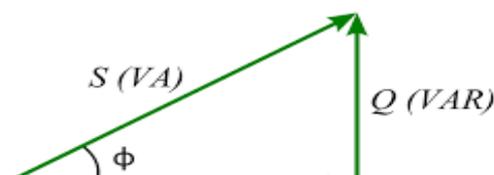
Perhitungan listrik tiga fasa

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

- P = Daya aktif (killo-Watt/kW)
- Q = Daya reaktif (killo Volt Ampere Reaktan/ KVAR)
- S = Daya semu (Volt-Ampere/VA)
- V = Tegangan listrik (Volt/V)
- I = Arus Listrik (Ampere/A)
- $\cos \varphi$ = Faktor daya

Daya aktif yaitu daya yang sebenarnya terpakai dengan satuan Watt. Daya semu yaitu daya yang merupakan perkalian antara tegangan rms dan arus rms. Daya reaktif yaitu daya yang digunakan untuk pembentukan medan magnet.



Gambar 2.1 Segitiga daya

Hubungan matematika daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dapat digambarkan dalam diagram segitiga daya.

2.2.7 Waktu Pemakaian Daya Listrik

Waktu pemakaian daya listrik terbagi menjadi 2 jenis yaitu:

1. WBP (Waktu Beban Puncak)
Suatu kondisi dimana konsumen menggunakan energi atau daya listrik untuk memenuhi energi puncak pembebanan pada waktu tertentu. Waktu beban puncak rata-rata pada suatu gedung ialah berada pada rentang waktu mulai pukul 17.00 s/d 22.00 (5 jam).
2. LWBP (Luar Waktu Beban Puncak)
Suatu kondisi dimana konsumen menggunakan energi atau daya listrik untuk memenuhi energi diluar waktu beban puncak. Waktu luar beban puncak rata-rata pada suatu gedung ialah berada pada rentang waktu mulai pukul 22.00 s/d 17.00 (19 jam).

Waktu Beban Puncak (WBP) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$WBP = K \times P \times \text{Biaya Pemakaian (Rp/kWh)} \dots\dots\dots(2.12)$$

Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$LWBP = P \times \text{Biaya Pemakaian (Rp/kWh)} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan:

K = Faktor perbandingan harga WBP dan LWBP ($1,4 \leq K \leq 2$)

P = Faktor pengali untuk pembeda S-3 murni dan S-3 komersial (S-3 murni, P=1. S-3 Komersial, P=1,3). Golongan tarif diatas 200kVA

2.2.8 Ketidakseimbangan Beban

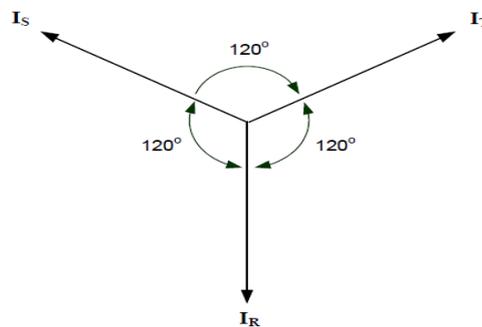
Ketidakseimbangan beban atau *unbalance* merupakan kondisi dimana besarnya arus yang mengalir pada tiap fasa berbeda besarnya. Suatu sistem

kelistrikan pada sebuah bangunan dikatakan memiliki beban seimbang jika memenuhi dua hal berikut:

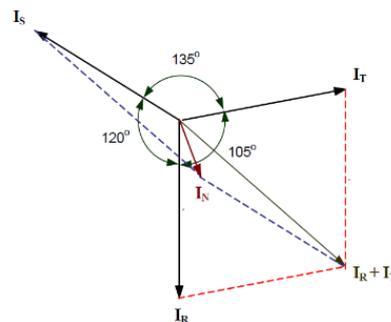
1. Ketiga Vektor arus atau tegangan sama besar.
2. Ketiga vektor arus saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Ada 3 kondisi ketidakseimbangan beban yaitu:

1. Ketika masing-masing vektor seimbang namun tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketika masing masing vektor tidak seimbang namun membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketika masing masing vektor tidak seimbang dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.2 Vektor arus dalam keadaan seimbang



Gambar 2.3 Vektor arus dalam keadaan tidak seimbang

(Sumber: Setiadji, 2006)

(Sumber: Setiadji, 2006)

Ketidakseimbangan beban menyebabkan penjumlahan ketiga vektor arus (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol, sehingga menyebabkan adanya arus

netral (I_N). Dapat dilihat pada gambar 2.2 bahwa vektor arus dalam keadaan seimbang sehingga penjumlahan vektornya sama dengan nol dan tidak menimbulkan arus netral, sedangkan pada gambar 2.3 merupakan gambar diagram vektor arus yang tidak setimbang sehingga menimbulkan adanya arus netral. Standar ANSI C84,1-1995 ketidakseimbangan arus dapat dikatakan baik apabila $\leq 20\%$.

a. Akibat Ketidakseimbangan Beban

Akibat ketidakseimbangan beban menyebabkan adanya arus pada titik netral yang disebabkan oleh penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) tidak sama dengan nol. Adanya arus netral menyebabkan rugi-rugi daya (*losses*). Untuk menghitung nilai rugi rugi daya dapat digunakan rumus berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan:

P_N = Rugi-rugi daya pada penghantar netral (W)

I_N^2 = Arus pada Penghantar netral (Ampere)

R_N = Hambatan penghantar (ohm)

b. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Dalam menghitung besarnya ketidakseimbangan beban digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

$$\begin{array}{ll} I_R = a \times I_{Rata-rata} & \text{Maka: } a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}} \\ I_S = b \times I_{Rata-rata} & \text{Maka: } b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}} \\ I_T = c \times I_{Rata-rata} & \text{Maka: } c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}} \end{array}$$

Sehingga :

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.16)$$

Hasil perhitungan ketidakseimbangan beban yaitu dalam satuan %

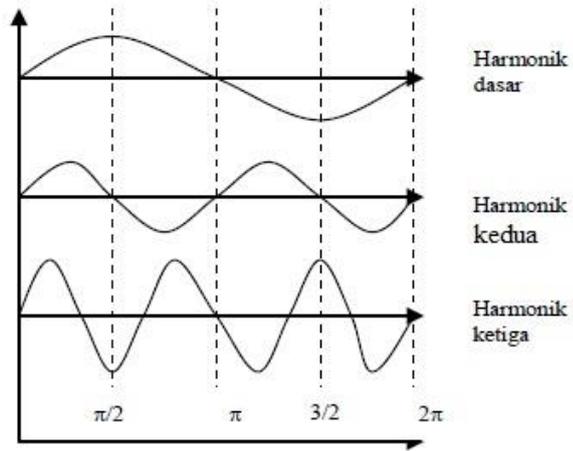
2.2.9 Harmonik

Harmonik merupakan sebuah permasalahan yang saat ini harus segera diatasi. Hal ini dikarenakan harmonik dapat menimbulkan banyak efek negatif pada sistem kelistrikan, baik itu sisi ekonomi maupun peralatan itu sendiri. Pada saat ini hampir semua peralatan listrik bersifat non-linear, seperti lampu hemat energi, *ballast* lampu, motor listrik, inverter, dan lainnya. Beban-beban non-linear tersebut penyebab terjadinya distorsi terhadap gelombang pada saluran daya listrik, padahal gelombang tegangan dan gelombang arus yang disalurkan serta dihasilkan dalam sistem listrik yang ideal adalah gelombang sinusoidal murni.

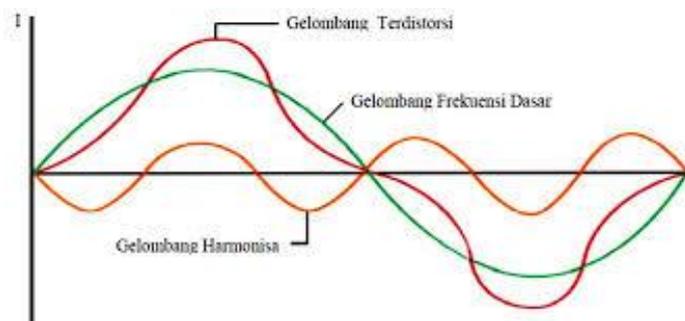
Definisi dari harmonik itu sendiri merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik akibat adanya distorsi gelombang tegangan dan gelombang arus. Gelombang akan terdistorsi karena adanya proses superposisi antara gelombang frekuensi dengan frekuensi dasar. Sehingga gelombang sinus pada sistem distribusi tidak lagi murni atau mengalami cacat riak-riak gelombang. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini akan membentuk gelombang-gelombang yang frekuensinya merupakan

kelipatan bulat bilangan harmonik dengan frekuensi dasarnya (f , $2f$, $3f$, dst). Gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dengan frekuensi dasar merupakan orde ke- h harmonik. Di Indonesia frekuensi dasar pada sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka untuk nilai frekuensi pada harmonik kedua (orde ke-2) yaitu 100 Hz, frekuensi harmonik ketiga (orde ke-3) 150 Hz dan seterusnya.

Gambar 2.4 Gelombang harmonik



(Sumber: <https://indone5ia.files.wordpress.com/2012/02/harmonik.jpg>, diakses tanggal 8 Mei 2019)



Gambar 2.5 Gelombang terdistorsi dan hasilnya

(Sumber: Djodi, 2013)

a. Efek Harmonik

Banyak sekali efek dari harmonik pada sistem tenaga listrik, baik itu sisi penyuplai maupun pada sisi pengguna listrik. selain mengakibatkan adanya kerusakan atau gangguan pada sistem distribusi listrik, efek harmonik juga dapat menimbulkan pengaruh ekonomis yang sangat signifikan. dampak yang paling besar dari efek harmonik yaitu terjadinya peningkatan panas pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada *transformator*. Kenaikan panas ini disebabkan karena selain oleh arus pada frekuensi dasar, harmonik juga menghasilkan arus eddy (*Eddy current losses*). Peningkatan arus eddy ini juga dapat mengurangi umur *transformator*. Berikut ini adalah beberapa efek yang ditimbulkan oleh harmonik:

1. Merusak kapasitor bank karena terjadinya resonansi harmonik.
2. Meningkatnya panas *eddy current* , menimbulkan fluk harmonik dan fluk *density* pada *transformator* meningkat.
3. Adanya arus pada kawat netral sehingga menyebabkan kabel menjadi panas.
4. Pemutus beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal, sehingga menimbulkan kegagalan proteksi.
5. Timbulnya getaran mekanik pada panel listrik yang merupakan getaran akibat resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi.
6. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWH meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, sehingga bisa mengakibatkan kesalahan penunjukan kWH meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.

b. Total Harmonic Distortion

Total *Harmonic Distortion* (THD) merupakan sebuah ukuran harmonik yang paling umum digunakan untuk menunjukkan tinggi rendahnya kandungan dari jumlah harmonik pada suatu gelombang yang terdistorsi. THD merupakan sebuah perbandingan dari hasil penjumlahan komponen harmonik dengan komponen fundamental (dasar). THD

dinyatakan dalam ukuran prosentase (%). Semakin besar nilai prosentase THD arus atau tegangan, maka akan semakin besar pula tingkat resiko kerusakan yang akan dialami oleh sistem kelistrikan. Untuk gelombang arus, nilai THD nya didefinisakn seperti berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.17)$$

Sedangkan untuk gelombang tegangan, nilai THD nya didefinisikan sebagai berikut:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan:

- THD_V = Total harmonic distortion tegangan
- THD_I = Total harmonic distortion arus
- V_h = Nilai tegangan harmonik (V)
- V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)
- I_h = Nilai arus harmonik (A)
- I_1 = Nilai arus fundamental (A)
- h = arus dan tegangan harmonik ke-h

c. Batas Standar Harmonik

Beberapa dokumen mengenai standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan, diantaranya adalah standar IEEE 519-1992, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, dan lain lain. Standar IEC biasanya digunakan untuk daerah Eropa dan standar ANSI dan IEEE banyak digunakan di Amerika. Mengenai standar yang digunakan pada penelitian ini adalah standar IEEE no 519 tahun 1992.

Nugroho S.S (2018) menyebutkan bahwa *Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE) adalah suatu lembaga internasional yang memiliki wewenang untuk melakukan riset dan penelitian dan analisis untuk memberikan sebuah batas standar untuk dijadikan acuan referensi dalam bidang kelistrikan dan elektronika dibeberapa negara.

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) menerangkan bahwa IEEE 519-1992 adalah praktik dan persyaratan yang direkomendasikan untuk mengendalikan harmonik dalam sistem tenaga listrik dan IEEE-519 lebih komprehensif dibandingkan dengan standar IEC.

Standar harmonik tegangan memiliki acuan berdasarkan nilai tegangan yang digunakan pada sebuah sistem, sedangkan untuk acuan harmonik arus adalah nilai perbandingan dari arus hubung singkat dengan arus yang bekerja pada beban.

Tabel 2.1 Batas Total Harmonic Distortion Tegangan

<i>Nominal Voltage</i>	<i>Individual Harmonic Order</i>	THD
$V \leq 69 \text{ kV}$	3.0 %	5.0 %
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1.5 %	2.5 %
$V \geq 161 \text{ kV}$	1.0 %	1.5 %

Tabel 2.2 Batas Total Harmonic Distortion Arus

SCA	<i>Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit</i>					THD
	$H < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$H \geq 35$	
$V_{supply} \leq 69 \text{ kV}$						
<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 %

Tabel 2.2 Batas Total Harmonic Distortion Arus

1000 >1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %
SCA	<i>Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit</i>					THD
	H<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	H≥35	
69 kV < V _{supply} < 161 kV						
<20	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
20-50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %
50-100	5,0 %	2,25 %	2,0 %	1,25 %	0,35 %	6,0 %
100-1000	6,0 %	2,75 %	2,5 %	2,0 %	0,5 %	7,5 %
>1000	7,5 %	3,5 %	3,0 %	2,5 %	0,7 %	10,0 %
V ≥ 161 kV						
<50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
≥50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %

Untuk mengetahui standar THD arus yang diijinkan pada tabel 2.2 dari suatu sitem atau trafo, terlebih dahulu mencari besar nilai arus *Short Circuit* (I_{sc}) dan mengukur arus beban (I_L). berikut cara perhitungan I_{sc}:

$$I_{SC} = \frac{\text{Daya Trafo (VA)}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot Z\%} \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

V_{LL} = Tegangan Antar Fasa (Volt)

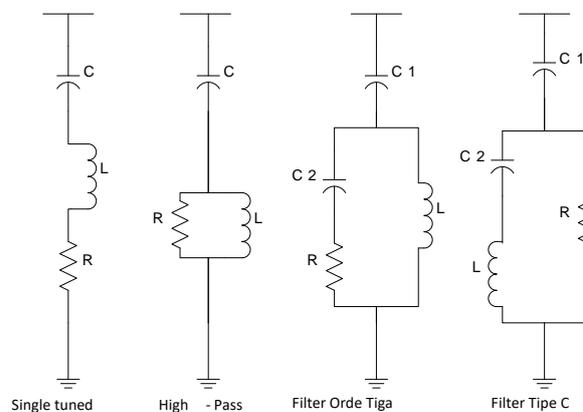
Z % = Impedansi Trafo

2.2.10 Filter

Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan harmonik dari beban nonlinear adalah dengan memasang Filter pada sistem distribusi listrik. Filter yang digunakan dalam mengatasi permasalahan harmonik merupakan filter yang dapat menyaring atau memperbaiki frekuensi dari arus dan tegangan, sehingga didapatkan frekuensi yang diinginkan. Filter mampu mengkompensasi harmonik yang berasal dari beban non-linear seperti mengkompensasi arus fundamental, Selain itu juga mampu memperbaiki kualitas dari suplai listrik arus bolak balik seperti *sags*, *swells*, dan *spikes*. Filter biasanya dipasang dekat dengan titik yang terkena distorsi. Ewarld F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) mengklasifikasikan jenis-jenis filter yang digunakan pada sistem untuk mereduksi harmonik menjadi filter pasif dan filter aktif.

2.2.10.1 Filter Pasif (Passive Filter)

Filter harmonisa *Pasif Single-Tuned* berfungsi sebagai filter yang dapat mengalihkan arus harmonisa pada orde tertentu yang tidak diinginkan atau melebihi batas standar yang telah ditentukan dalam suatu sistem tenaga. Rangkaian filter Pasif *Single-Tuned* terdiri dari komponen kapasitor, induktor, dan resistor sehingga disebut dengan rangkaian R-L-C. *Passive Filter* juga dapat dibedakan menjadi 4 macam yaitu:



Gambar 2.6 Pasif Filter

Filter Pasif *Single-Tuned* digunakan untuk mereduksi harmonisa orde frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Prinsip kerja utama dari filter harmonisa pasif adalah resonansi, yaitu menurunkan impedansi sekecil mungkin pada frekuensi yang ditala. Pada filter harmonisa pasif jenis *single-tuned*, hanya ada satu orde yang ditala. Dengan penambahan filter harmonisa pada sistem tenaga listrik yang mengandung harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa ke seluruh jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu, pemasangan filter harmonisa pasif juga dapat mengkompensasi daya reaktif dan memperbaiki faktor daya.

Dalam menentukan filter harmonisa *Pasif Single-Tuned* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

1. Spesifikasi Resistor

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$P = V \times I$$

$$\dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

R = Kapasitas Resistor(Ω)

V = Tegangan (V)

I = Arus Harmonisa Orde ke – 3

P = Kapasitas Daya Resistor (W)

2. Q Faktor :

$$X_L = X_C = X_n \dots\dots\dots(2.22)$$

$$Q = \frac{X_n}{R} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$X_n = Q \times R \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan:

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

X_C = Reaktansi Kapasitif (Ω)

Q = Kualitas Filter (30 – 100)

3. Spesifikasi Induktor :

$$X_L = \omega L \dots\dots\dots(2.25)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan:

L = Kapasitas Induktor Filter (H)

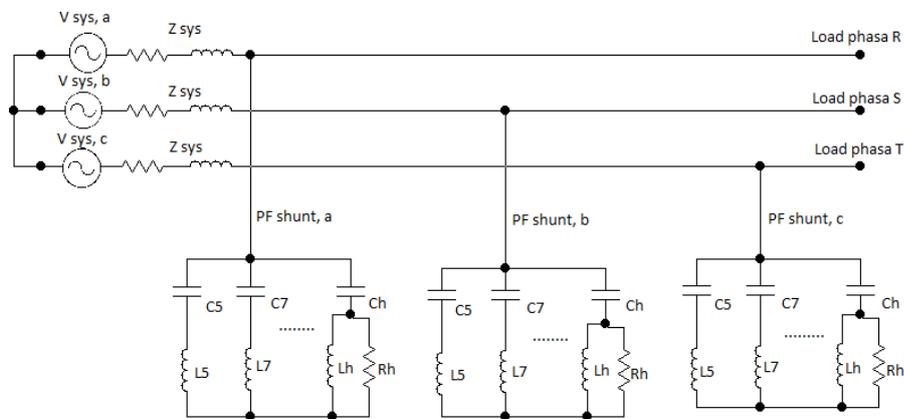
4. Spesifikasi Kapasitor:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan:

C = Kapasitas Capasitor Filter (F)



Gambar 2.7 Pemasangan filter pasif pada orde ke-5 dan ke-7 sistem tiga fasa

(Sumber: Ewald, 2008. Dengan modifikasi)

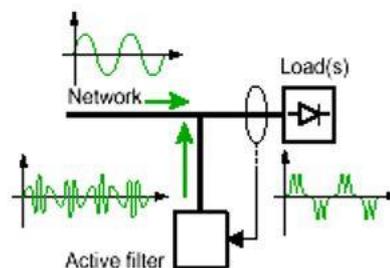
2.2.10.2 Filter Aktif (Active Filter)

Salah satu upaya untuk meminimalisasi atau mengurangi harmonisa yaitu dengan penggunaan filter aktif. Filter aktif adalah sebuah filter yang tersusun dari komponen elektronika daya yang rangkaian utamanya adalah inverter dan rangkaian pengontrol, selain itu juga ada kapasitor dan induktor untuk memperbaiki output yang kurang stabil dari filter aktif. Filter aktif juga dapat meningkatkan faktor daya sistem dan juga tidak

menghasilkan resonansi pada sistem. Konfigurasi penyusunan filter ini bisa secara seri ataupun paralel.

Pada penggunaannya filter aktif digunakan untuk mengkompensasi sebuah rangkaian yang terdistorsi harmonik dari beban non-linear yang berubah ubah. Sebuah filter aktif dapat diimplementasikan ketika harmonik yang terjadi pada sebuah orde berubah. Perubahan harmonik di tiap orde dikarenakan perubahan jumlah beban non-linear yang mengeluarkan arus harmonik berubah tiap beberapa saat. Sehingga filter ini cocok untuk menanggulangi harmonik pada suatu sistem kelistrikan sebuah gedung dengan beban yang tidak stabil.

Penggunaan filter aktif mempunyai keuntungan dibandingkan filter pasif yaitu : Penguatan dan frekuensinya mudah diatur, selama devais elektronika transistor ataupun op amp masih memberikan penguatan dan sinyal input tidak sekaku seperti pada filter pasif. Pada dasarnya filter aktif lebih mudah diatur karena tidak ada masalah beban, karena tahanan input tinggi dan tahanan output rendah. Filter aktif tidak membebani sumber input.



Gambar 2.8 Filter Aktif (Active Filter)

Cara kerja dari filter aktif yaitu dengan menghasilkan harmonisa dari inverter. Harmonisa ini diatur sedemikian rupa oleh rangkaian kontrol elektronika yang berupa PID, limiter, dan komparator sehingga

menghasilkan harmonisa yang nilainya sama dengan yang dihasilkan beban tetapi memiliki sudut fasa yang berbeda 180 derajat.

Schneider Electric (2008) Dalam menentukan filter aktif harmonisa dari *power analyzer data* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

Menghitung nilai X menjadi frekuensi arus fundamental

$$I_{RMS} = \sqrt{(1^2 + 0,2419^2)} * X \dots\dots\dots(2.29)$$

$$X = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{(1^2+0,2419^2)}} \dots\dots\dots(2.30)$$

Keterangan :

I_{RMS} = Arus_{RMS} (A)

0,2419 = Faktor safety

X = Frekuensi arus fundamental (A)

Menghitung nilai *Harmonic current_a*

$$I_{RMS} = \sqrt{(X^2 + Harmonic Current_a^2)} \dots\dots\dots(2.30)$$

$$X^2 + Harmonic Current_a^2 = I_{RMS}^2$$

$$Harmonic Current_a^2 = I_{RMS}^2 - X^2$$

$$Harmonic current_a = \sqrt{I_{RMS}^2 - X^2}$$

Jika nilai THD % = 5 % (nilai THD ini adalah nilai THD yang ingin kita capai dari penggunaan Ilter aktif ini, karena standar yang sudah ditentukan oleh IEEE 519-1992 yaitu pada range 50 s/d 100 Ampere, nilai THD dkategorikan baik apabila nilai THD ≤ 12 %).

$$I_{RMS} = \sqrt{X^2 + (THD * X)^2} \dots\dots\dots(2.31)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{X^2 + (5 \% * X)^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{X^2 + (0,05 * X)^2}$$

Menghitung nilai *Harmonic current_b*

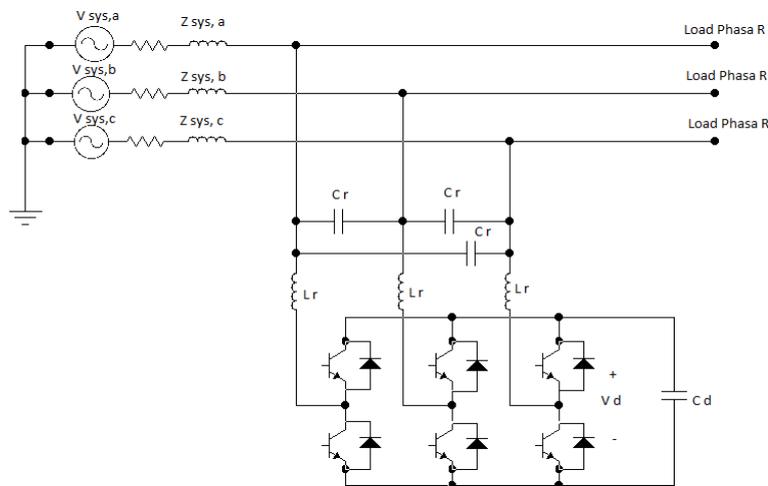
$$I_{RMS} = \sqrt{(X^2 + \text{Harmonic Current}_b^2)} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$X^2 + \text{Harmonic Current}_b^2 = I_{RMS}^2$$

$$\text{Harmonic Current}_b^2 = I_{RMS}^2 - X^2$$

$$\text{Harmonic current}_b = \sqrt{I_{RMS}^2 - X^2}$$

Dengan demikian mengurangi THDi (THD arus) ketika masukannya sebesar 20 % dan diturunkan menjadi 5 % yang dibutuhkan yaitu (*Harmonic current a* dikurangi *Harmonic current b*). Setelah itu memilih salah satu ukuran PCS+ Aktif Filter Untuk mengurangi THDi (THD arus) ke level 5 % akan membutuhkan ukuran berapa sesuai perhitungan di atas. Schneider Electric PCS+ Aktif Filter tersedia dalam ukuran 60 A, 120 A, 200 A, dan 300 A.



Gambar 2.9 Filter Aktif pada sistem tiga fasa

(Sumber: Ewald, 2008. Dengan modifikasi)