

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kualitas Daya Listrik

Seiring dengan meningkatnya penggunaan energi listrik dan utilitas kelistrikan, menyebabkan kualitas daya listrik pun semakin diperhatikan. Kualitas daya listrik ini menjadi isu utama pada industri tenaga listrik sejak akhir 1980-an. Kualitas daya listrik merupakan setiap masalah daya listrik yang berbentuk penyimpangan arus, tegangan atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau kesalahan pengoperasian pada peralatan konsumen atau pengguna listrik (Dugan et al., 2002).

Terdapat empat alasan utama yang mengharuskan kualitas daya listrik semakin diperhatikan, yaitu (Dugan et al., 2002):

- 1) Peralatan listrik saat ini banyak menggunakan kontrol berbasis mikroprosesor dan elektronik daya yang sensitif terhadap kualitas daya listrik.
- 2) Meningkatnya penekanan efisiensi sistem daya listrik secara keseluruhan menyebabkan terjadinya pertumbuhan pada penerapan peralatan yang mempunyai efisiensi tinggi, seperti penggunaan kapasitor untuk perbaikan faktor daya dan pengatur kecepatan motor listrik. Hal tersebut dapat meningkatkan tingkat harmonik pada sistem daya listrik dan membuat banyak orang khawatir terhadap dampaknya.
- 3) Pengguna energi listrik memiliki kesadaran yang lebih tinggi mengenai kualitas daya listrik. Pelanggan utilitas kelistrikan menjadi lebih

mengetahui masalah seperti *interruption*, peralihan transien, *sags* dan merasa harus untuk meningkatkan kualitas daya listriknya.

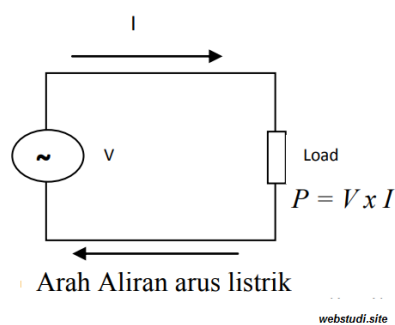
- 4) Saling berhubungannya sistem tenaga listrik dalam suatu jaringan interkoneksi, yang berarti kegagalan dari setiap komponen memiliki konsekuensi yang jauh lebih penting yaitu dapat mengakibatkan kegagalan pada komponen lainnya.

Kualitas daya meliputi tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang. secara teoritis, kualitas daya yang baik dapat diartikan bahwa tegangan yang disuplai sampai ke pengguna listrik dalam keadaan stabil dan dalam besaran yang ditentukan, seperti frekuensi AC stabil dan sangat dekat dengan nilai nominalnya (dalam sepersekian persen), bentuk gelombang atau bentuk kurva tegangan terhadap waktu sangat mirip dengan gelombang sinus (suatu kondisi yang juga dijelaskan sebagai tidak adanya distorsi harmonik). Semakin berkembangnya teknologi elektronik dalam beberapa tahun terakhir ini telah mengubah "beban listrik" menjadi peralatan yang sangat bervariasi dalam responnya terhadap perubahan tegangan, frekuensi, dan bentuk gelombang. (Meier, 2006) Selain itu, beban nonlinier pun meningkat khususnya beban terdistribusi seperti komputer, monitor TV, dan pencahayaan. Hal ini menarik arus harmonik yang memiliki efek merugikan termasuk gangguan komunikasi, hilangnya keandalan, peningkatan biaya pengoperasian, peralatan menjadi terlalu panas, kegagalan mesin, transformator dan kapasitor, dan pengukuran daya yang tidak akurat. (Fuchs & Masoum, 2008)

2.2 Daya Listrik

Daya yaitu ukuran energi per satuan waktu. Dari daya listrik dapat diketahui tingkat konsumsi atau produksi energi yang digunakan untuk melakukan usaha dalam sistem tenaga listrik. (Meier, 2006) Dalam sistem tenaga listrik terdapat tiga macam daya listrik yaitu daya semu (S) dengan satuannya yaitu *volt ampere* (VA), daya aktif (P) dengan satuannya yaitu Watt (W) dan daya reaktif (Q) dengan satuannya yaitu *volt ampere reactive* (VAr).

Terkait hal ini, yang dimaksud dengan daya yakni energi yang dikonsumsi untuk menjalankan kerja. Daya dalam sistem kelistrikan adalah energi listrik yang dipergunakan untuk melakukan kerja. Tenaga listrik dalam sistem tenaga listrik bisa dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu daya Nyata/Daya Aktif (*Apparent Power*) dengan satuan Watt yang disimbolkan dengan P, Daya *Reaktif* (*Reactive Power*) dengan satuan VAr (Volt Ampere Reaktif) yang disimbolkan dengan Q, serta Daya Semu dengan satuan VA (Volt Ampere) yang disimbolkan dengan S. Aliran arah arus listrik digambarkan 2.4 sebagai berikut ini :



Gambar 2. 1 Aliran Arah Arus Listrik
Sumber : (Dedi Makmur, 2022)

2.2.1 Daya Aktif

Daya aktif (Active Power) yaitu daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan dari daya aktif adalah Watt (W). (M. F. Hakim, 2014) Persamaan daya aktif seperti ditunjukkan pada persamaan (2.1) dan (2.2), yaitu :

$$\text{Untuk sistem 1 fasa : } P = V_{LN} \cdot I_{LN} \cos \varphi \quad (2.1)$$

$$\text{Untuk sistem 3 fasa : } P = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{LL} \cos \varphi \quad (2.2)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (watt)

V_{LN} = Tegangan Line – Netral (Volt)

V_{LL} = Tegangan Line – Line (Volt)

I_{LN} = Arus Line to Netral (Ampere)

I_{LL} = Arus Line to Line (Ampere)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.2 Daya Reaktif

Daya reaktif (*Reactive Power*) merupakan daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet ini akan terbentuk fluks medan magnet. Beberapa beban listrik yang dapat menimbulkan daya reaktif yaitu motor listrik, transformator, lampu pijar, dan lain – lain. Satuan dari daya reaktif yaitu volt ampere reactive (Var). (M. F. Hakim, 2014) Persamaan daya reaktif seperti ditunjukkan pada (2.3) dan (2.4), yaitu :

$$\text{Untuk sistem 1 fasa } Q = V_{LN} \cdot I_{LN} \sin \varphi \text{ (1 phase)} \quad (2.3)$$

$$\text{Untuk sistem 3 fasa } Q = \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_{LL} \sin \varphi \text{ (3 phase)} \quad (2.4)$$

Dimana :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V_{NL} = Tegangan *Line – Netral* (Volt)

I = Arus (Ampere)

V_{LL} = Tegangan *Line – line*

I_{LN} = Arus *Line to Netral* (Ampere)

I_{LL} = Arus *Line to Line* (Ampere)

Daya reaktif terbagi menjadi dua, yaitu (Rofii & Simanjuntak, 2018):

- 1) Daya reaktif induktif (*lagging*) yaitu daya yang diperlukan untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan oleh alat-alat induksi seperti: transformator, motor induksi dan lainnya.
- 2) Daya reaktif kapasitif (*leading*) yaitu daya yang dihasilkan oleh kapasitor dan mempunyai tanda yang berlawanan dengan daya reaktif induktif. Oleh karena itu, daya reaktif kapasitif dapat mengkompensasi daya reaktif induktif.

2.2.3 Daya Semu

Daya yang dihidupkan generator pada sistem pembangkit listrik dinamakan daya semu. Daya semu yakni daya yang diserap oleh beban atau yang dikeluarkan sumber *alternating current* (AC). Simbol daya semu (S) satuan daya semu VA (*Volt Ampere*). Dibawah ini adalah persamaan daya semu seperti yang ditunjukkan pada (2.5) dan (2.6) (M. F. Hakim, 2014)

$$\text{Untuk sistem 1 fasa } S = V_{LN} \cdot I_{LN} \text{ (1 phase)} \quad (2.5)$$

$$\text{Untuk sistem 3 fasa } S = \sqrt{3} \cdot V_{LL} I_{LL} \text{ (3 phase)} \quad (2.6)$$

Dengan :

S = Daya Semu (VA)

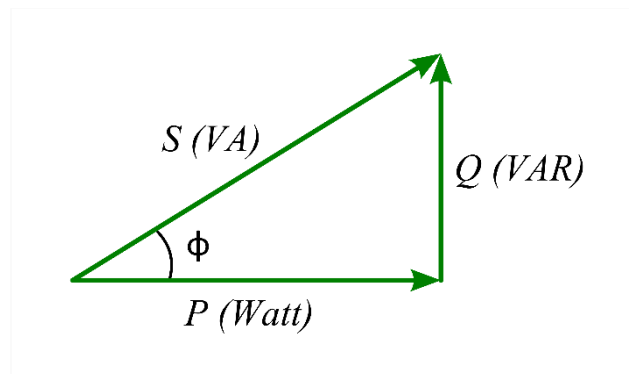
V_{LN} = Tegangan Line – Netral (Volt)

V_{LL} = Tegangan Line – Line

I_{LN} = Arus Line to Netral (Ampere)

I_{LL} = Arus Line to Line (Ampere)

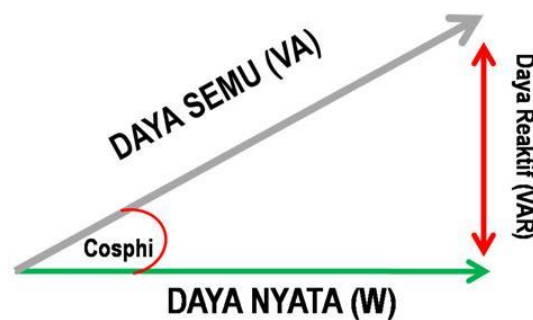
Hubungan ketiga daya tersebut dinamakan sistem segitiga daya yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut ini :



Gambar 2. 2 Trigonometri Daya Aktif, Daya Reaktif, dan Daya Semu
Sumber : (Dedi Makmur, 2022)

2.3 Segitiga Daya

Definisi dari segitiga daya dalam hal ini ialah hubungan matematika antara berbagai jenis daya, yaitu daya aktif, reaktif, dan daya semu. Hubungan ini dengan prinsip trigonometri sebagaimana ditunjukkan 2.6 berikut ini Bahar, 2017):



Gambar 2. 3 Segitiga Daya

Sumber : (Azly, 2016)

Dengan :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

$$Q = S . \tan \varphi \quad (2.8)$$

$$P = S . \cos \varphi \quad (2.9)$$

2.4 Jenis – Jenis Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalu ada sumber dan beban. Sumber pada rangkaian listrik sendiri terdiri dari sumber listrik DC (*Direct Current*) dan AC (*Alternating Current*). Pada sumber listrik DC beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Sehingga reaktansi induktif (X_L) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan *short circuit*, sedangkan reaktansi kapasitif (X_C) akan menjadi tak terhingga yang berarti bahwa kapasitor tersebut akan *open circuit*. Jadi sumber listrik DC akan mengakibatkan beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian listrik. Berbeda halnya pada sumber listrik AC beban listrik dibedakan menjadi tiga yaitu beban resistif, beban induktif dan beban kapasitif. (Bahar, 2017)

2.4.1 Beban Resistif

Ini adalah resistor murni, beban sama sekali tidak menyerap daya reaktif namun menyerap daya aktif, sehingga tegangan sefase dengan arus, contoh : lampu pijar, pemanas. (Rizal, 2016)

Beban resistif (R) merupakan beban listrik yang hanya terdiri dari komponen tahanan (*resistance*) seperti pada gambar 2.2. Contoh dari beban resistif yaitu elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar (Shintawaty, 2013). Resistor tidak menyebabkan adanya pergeseran fasa antara arus dan tegangan pada rangkaian listrik AC seperti Gambar 2.3 (Noor et al., 2017).

2.4.2 Beban Induktif

Ini merupakan beban berupa induktor atau kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, umumnya terdapat pada inti besi yang menyerap daya reaktif (kVar) serta daya aktif (kW) dan memiliki faktor daya diantara $0 - 1$, beban induktif bersifat lagging yang dimana tegangan mendahului arus (tidak sefase) sebesar φ° . Contoh : motor – motor listrik induktor, AC dan juga transformator. (Rizal, 2016)

Beban induktif (L) yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti *coil*, motor-motor listrik, transformator dan solenoida (Noor et al., 2017). Beban induktif ini menimbulkan tahanan (X_L) dan menyebabkan pergeseran fasa pada arus sehingga bersifat *lagging* yang disebabkan karena adanya energi yang tersimpan berupa magnetis maka fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Untuk beban induktif murni $Z = X_L$ arus akan tertinggal sejauh sudut 90° terhadap tegangan seperti terlihat pada gambar 2.6. (Shintawaty, 2013)

2.4.3 Beban Kapasitif

Ini merupakan beban yang terdiri dari satu atau beberapa rangkaian kapasitor, beban kapasitif ini melepaskan daya reaktif (kVar) dan menyerap daya aktif (kW) dengan faktor daya diantara $0 - 1$, beban kapasitif bersifat leading yang dimana arus mendahului tegangan (tidak sefase) sebesar φ° Contoh : Kapasitor. (Rizal, 2016)

Beban kapasitif (C) yaitu komponen yang mempunyai kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) dalam suatu sirkuit. Untuk kondisi beban kapasitif murni $Z =$

X_c arus akan mendahului tegangan sejauh sudut 90° seperti terlihat pada gambar 2.9. (Shintawaty, 2013)

2.5 Faktor Daya (*Power Factor*)

Faktor daya yakni cosinus dari perbedaan sudut fasa antara tegangan dengan arus. $\cos \varphi$ simbol dari faktor daya serta rentang nilai yang dimiliki berkisar 0 sampai dengan 1. Nilai faktor daya mendekati 1 memiliki arti semakin baik. Selanjutnya nilai faktor daya bisa dicari melalui melakukan pembagian terhadap daya aktif (P) dengan daya semu (S). Terdapat tiga faktor daya, yakni *unity* yang ditentukan jenis beban pada sistem, faktor daya mendahului (*leading*), serta faktor daya tertinggal (*lagging*). (Rofii & Simanjuntak, 2018)

Nilai Faktor daya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang ditunjukkan dalam persamaan (2.10 – 2.11)

$$\begin{aligned}\text{Faktor daya} &= \frac{\text{daya aktif } (p)}{\text{daya semu } (s)} \\ &= \frac{V \cdot I \cos \varphi}{V \cdot I} \\ &= \cos \varphi\end{aligned}\tag{2.10}$$

$$\text{Faktor Daya} = \frac{P}{S} = \frac{V_{LN} \times I_{LN}}{V_{LN} \times I_{LN}} = \cos \varphi\tag{2.11}$$

Faktor daya mengukur persentase daya yang dikeluarkan dalam penggunaannya. Faktor daya mempunyai nilai dari 0 sampai 1. (Dugan et al., 2002) Dalam sistem tenaga listrik terdapat tiga jenis faktor daya yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem yaitu faktor daya *unity*, faktor daya tertinggal (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*). (Rizal, 2012)

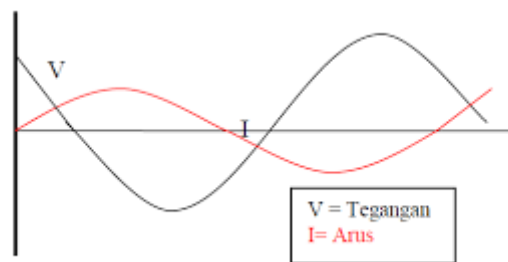
2.5.1 Daya Tertinggal (*Lagging*)

Lagging (daya tertinggal) dipengaruhi oleh kondisi beban, dimana tegangan digunakan sebagai acuan dalam mengetahui kondisi lagging atau leading. Faktor ini jika arus tertinggal dari tegangan senilai θ° , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5



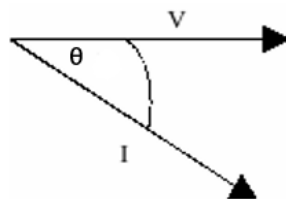
Gambar 2. 4 Rangkaian Induktor

Sumber : (Shintawaty, 2013)



Gambar 2. 5 Gelombang Sinus pada Faktor Daya Lagging

Sumber : (Rizal, 2016)



Gambar 2. 6 Arus Tertinggal dari Tegangan Sebesar Sudut θ

Sumber : (Rizal, 2012)

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa arus tertinggal dari tegangan dan kemudian daya semu didahului oleh daya reaktif, maknanya bahwa beban menerima atau memerlukan daya reaktif dari sistem.

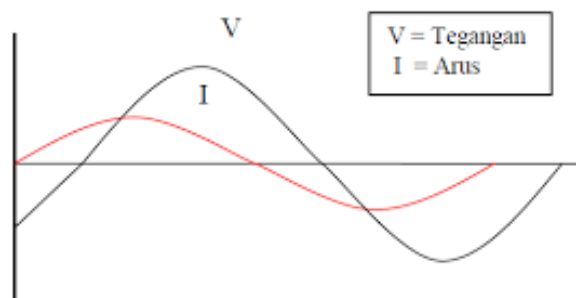
2.5.2 Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Leading (daya mendahului) dipengaruhi oleh kondisi beban, dimana tegangan digunakan sebagai acuan dalam mengetahui kondisi lagging atau leading. Faktor ini jika tegangan didahului oleh arus sebesar θ° , maka beban akan menghasilkan daya reaktif, sebagaimana Gambar 2.7 berikut.



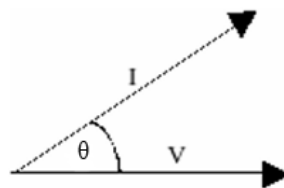
Gambar 2. 7 Rangkaian Induktor

Sumber : (Rizal, 2016)



Gambar 2. 8 Gelombang Sinus pada Faktor Daya *Leading*

Sumber : (Rizal, 2016)



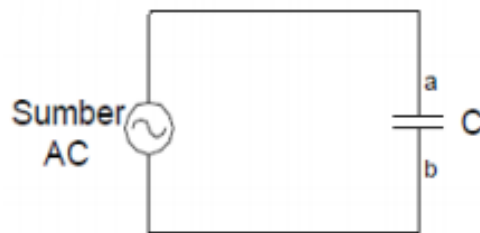
Gambar 2. 9 Gambar 2. 9 Arus Mendahului dari Tegangan Sebesar Sudut θ

Sumber : (Rizal, 2012)

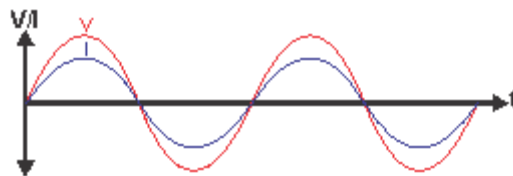
Gambar 2.9 menunjukkan bahwa tegangan didahului arus dan kemudian daya reaktif tertinggal dari daya semu, artinya sistem diberikan daya reaktif oleh beban.

2.5.3 Faktor Daya Unity

Faktor daya unity yakni ketika nilai $\cos \theta = 1$, tegangan serta arus sefasa, faktor ini akan muncul jika beban memiliki sifat resistif murni sebagaimana dalam Gambar 2.10 berikut :



Gambar 2. 10 Rangkaian Kapasitor
Sumber : (Rizal, 2016)



Gambar 2. 11 Arus Sephasa dengan Tegangan
Sumber : (Rizal, 2016)



Gambar 2. 12 Arus Sefasa Dengan Tegangan
Sumber: (Rizal, 2016)

Gambar 2.11 memperlihatkan nilai $\cos \theta$ adalah 1, dimana menjadikan banyak daya nyata yang dikonsumsi beban tidak berbeda dari daya semu.

2.6 Penyebab Faktor Daya Rendah

Alasan utama faktor daya rendah dari sistem grid atau jaringan listrik adalah beban induktif. Dalam rangkaian induktif murni, arus tertinggal 90° terhadap tegangan dan perbedaan sudut fasa antara arus dengan tegangan menyebabkan faktor daya mendekati nilai nol. Rendahnya faktor daya mengakibatkan arus dan

tegangan berlawanan fase, dengan demikian hasil perkalian didapatkan daya dalam Volt Ampere (VA) tidak menghasilkan daya dalam Watt (W).

Peningkatan beban induktif pada sistem tenaga listrik bisa menjadikan nilai faktor daya (PF) selama penyaluran daya mengalami penurunan. Faktor daya (PF) yang menurun menyebabkan banyak kerugian, diantaranya :

- 1) Penyaluran daya efisiensi menurun
- 2) Kebutuhan kVA membesar
- 3) Adanya drop tegangan mutu listrik menjadi rendah
- 4) Bertambah besarnya rugi – rugi panas kawat dan peralatan

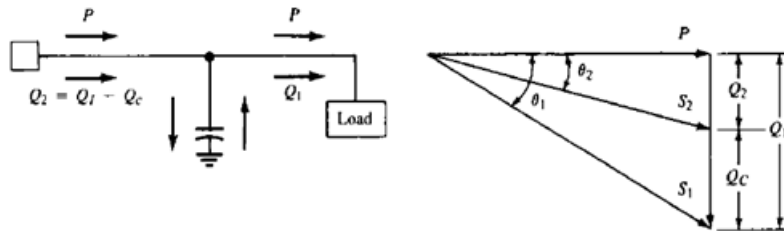
Penyedia layanan listrik PT.PLN memberlakukan denda VAR karena alasan kerugian akibat turunya faktor daya (PF), konsumen dihimbau untuk berpartisipasi dalam menjaga faktor daya pada tingkat idealnya agar tidak membayar denda akibat denda kerugian turunya faktor daya. (Dedi Makmur, 2022)

2.6.1 Perbaikan Faktor Daya

Memperbaiki faktor daya dengan tujuan menaikkan harga $\cos \varphi$ (pf) yang low, mengurangi sudut ϕ_1 dan menjadi ϕ_2 artinya $\phi_1 > \phi_2$ merupakan hal yang mudah dilakukan. Mencoba mengurangi sudut ϕ yakni dengan mengurangi komponen daya reaktif (VAR). Langkah mengurangi komponen daya reaktif yang bersifat induktif melalui cara menambahkan sumber daya reaktif tertentu yakni berwujud kapasitor atau disebut kapasitor bank.

Menyimpan muatan listrik ketika arus mengalir adalah sifat kapasitor menyebabkan timbulnya tegangan listrik pada muatan yang terkumpul. Terdapat cadangan daya reaktif yang sangat tinggi pada muatan yang terkumpul. Oleh karena

itu, apabila setiap saat jaringan memerlukan daya reaktif, maka kapasitor dapat memberikan cadangan tersebut, yang seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 13 Perbaikan Faktor Daya menggunakan Kapasitor

Sumber : (Dedi Makmur, 2022)

Metode perhitungan segitiga daya dapat dipergunakan untuk perbaikan faktor daya, dengan persamaan yang diperlihatkan pada (2.12 – 2.13)

$$Q_1 = P \times \tan \varphi_1 \quad (2.12)$$

$$Q_2 = P \times \tan \varphi_2 \quad (2.13)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (2.14)$$

Atau :

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Dan untuk menghitung persamaan besar kapasitas kapasitor dapat menggunakan persamaan berikut (Hajar & Rahayuni, 2020) :

$$C = \frac{Q_c}{V^2 \times \omega} \quad (2.15)$$

Dengan :

Q_1 = Daya reaktif awal atau sebelum perbaikan (Var)

Q_2 = Daya semu (Var)

φ_1 = Sudut fase awal

φ_2 = Sudut fasa yang diinginkan

Q_c = Daya reaktif kapasitor bank yang dibutuhkan (Var)

C = Kapasitas kapasitor (Farad)

V = Tegangan (Volt)

P = Daya aktif

$$\omega = 2\pi f$$

Memperbaiki faktor daya memiliki beberapa keuntungan, diantaranya :

1. Menjadi lebih kecil kebutuhan daya reaktif
2. Menjadi kecil rugi – rugi daya
3. Pengaturan tegangan menjadi lebih baik dan drop tegangan menjadi lebih menurun.

Ada juga metode lain seperti metode tabel kompensasi seperti berikut :

Pada tabel kompensasi ini terdapat data faktor daya sebenarnya ($\cos \varphi_1$) faktor daya yang diinginkan ($\cos \varphi_2$) dan faktor pengali. Sehingga dari tabel 2.1 dapat diketahui besar daya reaktif yang dibutuhkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$Q(kVar) = MF \times P (kW) \quad (2.16)$$

Dimana :

MF = Faktor Pengali

Tabel 2. 1 Tabel 2.1 Kompensasi Faktor Daya ($\cos f$)

Sumber: (Schneider Electric, 2018)

Before compensation		kvar rating of capacitor bank to install per kW of load, to improve cos (the power factor) or tan, to a given value														
		tan φ	0.75	0.59	0.48	0.46	0.43	0.40	0.36	0.33	0.29	0.25	0.20	0.14	0.0	
tan φ	cos φ	cos φ	0.80	0.86	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.955	0.96	0.97	0.98	0.99	1	
2.29	0.40		1.557	1.691	1.805	1.832	1.861	1.895	1.924	1.959	1.998	2.037	2.085	2.148	2.288	
2.22	0.41		1.474	1.625	1.742	1.769	1.798	1.831	1.840	1.896	1.935	1.973	2.021	2.082	2.225	
2.16	0.42		1.413	1.561	1.681	1.709	1.738	1.771	1.800	1.836	1.874	1.913	1.961	2.022	2.164	
2.10	0.43		1.358	1.499	1.624	1.651	1.680	1.713	1.742	1.778	1.816	1.855	1.903	1.964	2.107	
2.04	0.44		1.290	1.441	1.558	1.585	1.614	1.647	1.677	1.712	1.751	1.790	1.837	1.899	2.041	
1.98	0.45		1.230	1.384	1.501	1.532	1.561	1.592	1.628	1.659	1.695	1.737	1.784	1.846	1.988	
1.93	0.46		1.179	1.330	1.446	1.473	1.502	1.533	1.567	1.600	1.636	1.677	1.725	1.786	1.929	
1.88	0.47		1.130	1.278	1.397	1.425	1.454	1.485	1.519	1.532	1.588	1.629	1.677	1.758	1.881	
1.83	0.48		1.078	1.228	1.343	1.370	1.400	1.430	1.464	1.497	1.534	1.575	1.623	1.684	1.826	
1.78	0.49		1.030	1.179	1.297	1.326	1.355	1.386	1.420	1.453	1.489	1.530	1.578	1.639	1.782	
1.73	0.50		0.982	1.232	1.248	1.276	1.303	1.337	1.369	1.403	1.441	1.481	1.529	1.590	1.732	
1.69	0.51		0.936	1.087	1.202	1.230	1.257	1.291	1.323	1.357	1.395	1.435	1.483	1.544	1.686	
1.64	0.52		0.894	1.043	1.160	1.188	1.215	1.249	1.281	1.315	1.353	1.393	1.441	1.502	1.644	
1.60	0.53		0.850	1.000	1.116	1.144	1.171	1.205	1.237	1.271	1.309	1.349	1.397	1.458	1.600	
1.56	0.54		0.809	0.959	1.075	1.103	1.130	1.164	1.196	1.230	1.268	1.308	1.356	1.417	1.559	
1.52	0.55		0.769	0.918	1.035	1.063	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519	
1.48	0.56		0.730	0.879	0.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480	
1.44	0.57		0.692	0.841	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442	
1.40	0.58		0.655	0.805	0.921	0.949	0.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405	
1.37	0.59		0.618	0.768	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368	
1.33	0.60		0.584	0.733	0.849	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334	
1.30	0.61		0.549	0.699	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299	
1.27	0.62		0.515	0.665	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265	
1.23	0.63		0.483	0.633	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233	
1.20	0.64		0.450	0.601	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200	
1.17	0.65		0.419	0.569	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.027	1.169	
1.14	0.66		0.388	0.538	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138	
1.11	0.67		0.358	0.508	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108	
1.08	0.68		0.329	0.478	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079	
1.05	0.69		0.299	0.449	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049	
1.02	0.70		0.270	0.420	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020	
0.99	0.71		0.242	0.392	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.850	0.992	
0.96	0.72		0.213	0.364	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963	
0.94	0.73		0.186	0.336	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936	
0.91	0.74		0.159	0.309	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909	
0.88	0.75		0.132	0.282	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882	
0.86	0.76		0.105	0.255	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855	
0.83	0.77		0.079	0.229	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829	
0.80	0.78		0.053	0.202	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803	
0.78	0.79		0.028	0.176	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776	
0.75	0.80			0.150	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.750	
0.72	0.81			0.124	0.240	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724	
0.70	0.82			0.098	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698	
0.67	0.83			0.072	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.530	0.672	
0.65	0.84			0.046	0.162	0.190	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645	
0.62	0.85			0.020	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.620	
0.59	0.86				0.109	0.140	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.343	0.390	0.450	0.593	
0.57	0.87				0.083	0.114	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.424	0.567	
0.54	0.88				0.054	0.085	0.112	0.143	0.175	0.209	0.246	0.288	0.335	0.395	0.538	
0.51	0.89				0.028	0.059	0.086	0.117	0.149	0.183	0.230	0.262	0.309	0.369	0.512	
0.48	0.90					0.031	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.341	0.484	

Dapat dimisalkan apabila ingin menaikkan faktor daya ($\cos \phi$) dari 0,75 menjadi 0,93 dibutuhkan kapasitas kapasitor sebesar 0,487 kVAr per kW. Dan ada juga metode kwitansi PLN, seperti berikut :

Metode ini memerlukan data kwitansi PLN selama satu periode (misalnya enam bulan sampai dengan satu tahun). Dari kwitansi PLN tersebut dapat diketahui

daya aktif maupun daya reaktifnya sehingga bisa dihitung faktor daya dan kebutuhan daya reaktif untuk perbaikan faktor daya.

2.7 Pemakaian Daya Aktif dan Daya Reaktif Pelanggan

PT. PLN memiliki tenaga jual berupa kWh dan kVArh. kWh merupakan daya aktif (energi nyata) yang digunakan oleh pelanggan. Dalam penggunaannya daya aktif dibagi menjadi dua yaitu Waktu Beban Puncak (WBP) dan Luar Waktu Beban Puncak (LWBP). Sedangkan kVArh merupakan daya reaktif yang diperhitungkan dalam tagihan listrik bulanan pelanggan tarif industri, bisnis 3, social, pemerintahan dan T/TM, karena pelanggan menggunakan Stand Meter listrik 3 fasa yang menghitung WBP dan LWBP. (Kartikaningtyas & Ariyanto, 2015)

Untuk menghitung pemakaian daya aktif dan daya reaktif pelanggan dengan metode kuitansi tagihan listrik PLN dapat menggunakan persamaan berikut (Fauzyah, 2020) :

$$P_{\text{tagihan}} = (\text{Stand Akhir} - \text{Stand Awal}) \times \text{Faktor Kali Meter} \quad (2.17)$$

$$Q_{\text{tagihan}} = (\text{Stand Akhir} - \text{Stand Awal}) \times \text{Faktor Kali Meter} \quad (2.18)$$

Dimana :

$$\text{Stand Awal} = \text{LWBP Awal} + \text{WBP Awal} \quad (2.19)$$

$$\text{Stand Akhir} = \text{LWBP Akhir} + \text{WBP Akhir} \quad (2.20)$$

Kemudian perhitungan daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAr) nya sebagai berikut :

$$P = \frac{P_{\text{tagihan}}}{\text{jam nyala} \times \text{jumlah hari}} \quad (2.21)$$

$$P = \frac{Q_{\text{tagihan}}}{\text{jam nyala} \times \text{jumlah hari}} \quad (2.22)$$

Keterangan :

P_{tagihan} = Pengguna kWh pelanggan selama sebulan

Q_{tagihan} = Pengguna kVArh pelanggan selama sebulan

2.8. Kapasitor Bank

Kapasitor bank digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos \varphi$) dan mengurangi rugi – rugi transmisi. Rating tegangan unit kapasitor bervariasi dari 240 V sampai 25 kV dan rating kapasitas dari 2,5 kVAr sampai 1 MVar. (PT PLN (PERSERO), 2014) Penggunaan kapasitor bank dalam meningkatkan nilai faktor daya ($\cos \varphi$) akan mempengaruhi besarnya arus listrik. Pemasangan kapasitor bank pada sebuah sistem listrik dapat memberikan keuntungan sebagai berikut (Prayudi & Wiharja, 2006):

- a. Meningkatkan kemampuan jaringan dalam menyalurkan daya.
- b. Optimasi biaya, dikarenakan ukuran kabel diperkecil.
- c. Mengurangi besarnya nilai jatuh tegangan.
- d. Mengurangi naiknya arus atau suhu pada kabel, sehingga mengurangi rugi-rugi daya.

Peningkatan faktor daya ini tergantung dari besar nilai kapasitor yang dipasang (kVAr). Besarnya pemakaian energi listrik itu disebabkan karena banyak dan beraneka ragam peralatan (beban) listrik yang digunakan. Beban listrik yang digunakan umumnya bersifat induktif dan kapasitif. Dimana beban induktif (positif) membutuhkan daya reaktif seperti trafo pada *rectifier*, motor induksi (AC) dan lampu TL, sedangkan beban kapasitif (negatif) mengeluarkan daya reaktif. Jika faktor daya pelanggan

rendah maka kapasitas daya aktif yang dapat digunakan oleh pelanggan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan semakin menurunnya faktor daya sistem kelistrikan pelanggan. Akibat dari menurunnya faktor daya akan muncul beberapa persoalan sebagai berikut (Prayudi & Wiharja, 2006):

- a. Membesarnya penggunaan daya listrik kWh karena rugi-rugi.
- b. Membesarnya penggunaan daya listrik kVAr.
- c. Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan.

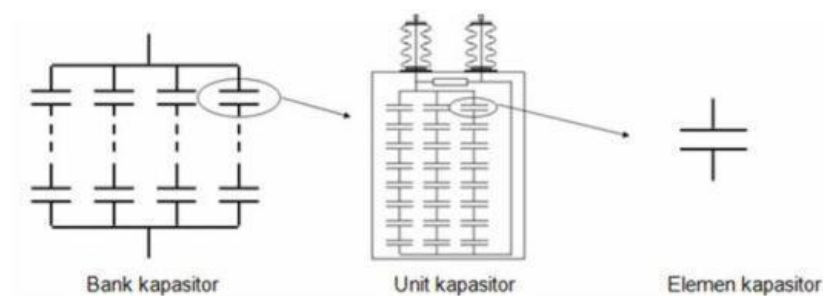
Pada tegangan rendah, untuk perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor dapat dilakukan dengan cara (Schneider Electric, 2018):

- 1) *Fixed Capacitor*, yaitu dengan memberikan sebuah beban kapasitif yang tetap ataupun berubah-ubah pada beban (Ahmad et al., 2012). Cara ini menggunakan satu atau lebih kapasitor untuk mendapatkan tingkat kompensasi yang konstan. Kontrol yang mungkin dapat dilakukan pada *fixed capacitor* yaitu (Schneider Electric, 2018):

- a. Manual: dengan *circuit breaker* atau *load break switch*
- b. Semi otomatis: dengan kontraktor
- c. Disambungkan langsung ke peralatan dan menyalakannya
- d. Kapasitor ini dapat diterapkan di (Schneider Electric, 2018):
- e. Terminal beban induktif (motor dan transformator).
- f. Busbar yang memasok banyak motor kecil dan peralatan induktif yang kompensasi individualnya akan terlalu mahal.
- g. Dalam kasus dimana tingkat beban cukup konstan.

2) *Automatic Capacitor Bank*, jenis peralatan ini memberikan kontrol kompensasi otomatis, dengan mempertahankan dalam batas dekat nilai faktor daya yang telah *disetting*. Biasanya diterapkan dalam instalasi listrik dengan daya aktif dan atau daya reaktif nya relatif besar. (Schneider Electric, 2018). Pada tipe ini jenis panel dilengkapi dengan sebuah *Power Factor Controller* (PFC) sebagai pengaman. PFC akan menjaga nilai faktor daya pada jaringan listrik sesuai dengan target yang telah ditentukan. Apabila terjadi perubahan beban, maka PFC akan secara otomatis memperbaiki faktor daya. (Ahmad et al., 2012)

Pemasangan kapasitor bank pada sebuah sistem listrik dapat memberikan keuntungan sebagai berikut. Bagian – bagian kapasitor bank sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.14 berikut ini :



Gambar 2. 14 Bagian – bagian Kapasitor Bank

Sumber: (Rangga, 2020)



Gambar 2. 15 Kapasitor Bank di Lapangan

Sumber: (Rangga, 2020)

Komponen kapasitor bank terdiri dari beberapa elemen yaitu :

1. Elemen Kapasitor

Bagian paling kecil yang ada pada sebuah kapasitor yang berbentuk film plastic dan aluminium disebut dengan elemen kapasitor. Elemen kapasitor terbuat dari dua elektroda yang dipisahkan oleh dielektrik.

2. Unit Kapasitor

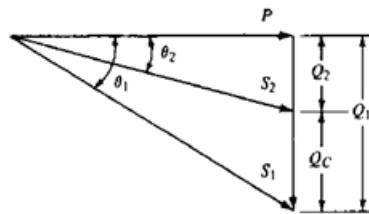
Terdapat resistor yang melengkapi unit kapasitor yang berguna menjadi alat pengosongan (elemen pelepasan muatan kapasitor). Unit kapasitor meliputi beberapa elemen kapasitor yang dihubungkan dalam suatu matriks secara seri dan paralel.

3. Kapasitor bank adalah colony atau kumpulan beberapa kapasitor untuk menyimpan energi listrik yang dihubungkan secara paralel dan seri satu sama lain. Penyimpan yang dihasilkan selanjutnya dipergunakan dalam memperbaiki kelambatan atau menetralkan

faktor daya serta menjadikan total keseluruhan energi yang tersimpan meningkat. Kapasitor bank bersifat kapasitif.

1. Ukuran Kapasitor untuk Perbaikan Faktor Daya

Ukuran seberapa besar kapasitor yang digunakan dalam meningkatkan faktor daya bisa diketahui, yakni sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.16 berikut ini :



Gambar 2. 16 Penentuan Rating Kapasitor

Sumber : (Dedi Makmur, 2022)

Jika terjadi perubahan faktor daya menjadi $\cos \varphi_2$ dari sebelumnya $\cos \varphi_1$ maka kVAr pada faktor daya yang diperbaiki yaitu $kW \times \tan \varphi_2$ serta kVAr pada faktor daya mula – mula yaitu $kW \times \tan \varphi$. Komponen KW bernilai konstan, sementara VAR dan kVA mengalami perubahan dengan faktor daya yang juga berubah. Oleh karena itu, seberapa besar rating daya reaktif kapasitor (Q_c) yang diperlukan dalam meningkatkan faktor daya ditunjukkan dalam persamaan berikut (2.23).

$$Q_c = (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.24)$$

Penentuan daya reaktif setelah perbaikan dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.14) :

$$Q_2 = Q_1 - Q_c \quad (2.25)$$

Dimana :

Q_1 = Daya Reaktif awal sebelum atau sebelum perbaikan

Q_c = Daya Reaktif Kapasitor

1. Kapasitansi Kapasitor

Ini adalah kemampuan kapasitor untuk bisa menampung muatan elektron.

2. Reaktansi Kapasitif

Arus rangkaian yang mendahului tegangannya diakibatkan oleh reaktansi kapasitif ini. Reaktansi kapasitif adalah suatu elemen yang menahan arus listrik bolak – balik dalam rangkaian kapasitif. Ini dirumuskan dengan persamaan yang diperlihatkan pada persamaan (2.26)

$$X_c = \frac{1}{2\pi n f} \quad (2.26)$$

Dengan :

π = konstanta besar 3,14

X_c = reaktansi kapasitif

f = frekuensi (Hz)

ini dirumuskan pula dengan persamaan :

$$X_c = \frac{V_c}{I_c} \quad (2.27)$$

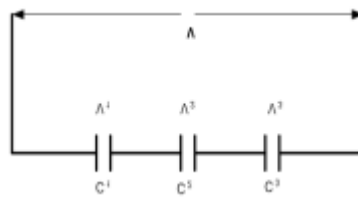
2.9 Jenis Jenis Kapasitor

Kapasitor menurut cara pemasangannya terdiri dari :

2.9.1 Kapasitor Seri

Kapasitor seri adalah kapasitor yang dipasang secara seri dengan jaringan listrik yang seperti halnya pada kondensor dan kapasitansi shunt. Kapasitansi seri

juga merupakan sumber daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya, dengan timbulnya komponen tenaga pada kapasitor. Selain itu juga merupakan reaktif negatif yang dapat menetralkan reaktansi induktif dari jaringan. Kapasitor yang dipasang secara seri dengan saluran mempunyai efek yang utama untuk mengurangi susut tegangan yang disebabkan oleh reaktansi induktif.



Gambar 2. 17 Rangkaian Kapasitor Hubungan Seri

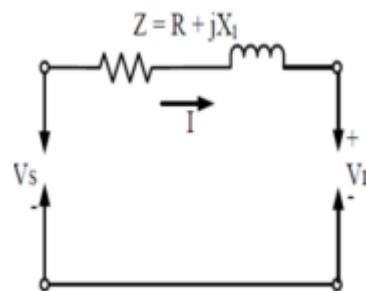
(Sumber: Ritonga, M. M. (2019))

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (2.28)$$

Suatu kapasitor seri dapat diasumsikan sebagai suatu reaktansi kapasitif negatif yang terhubung seri dengan jala–jala. Dengan memasang kapasitor seri pada jaringan maka tegangan akan naik. Kenaikan tegangan pada kapasitor adalah sebagai fungsi dari arus. Perubahan tegangan tersebut adalah secara otomatis dan sesaat dengan perubahan arus. Dengan demikian kapasitor seri dapat juga dianggap sebagai suatu pengatur tegangan (voltage regulator), akan tetapi berbeda dengan induction regulator. Perbedaannya ialah pada kapasitor seri tak dapat mengkompensasi perubahan tegangan yang terjadi pada sumber dan hanya dapat mengkompensasi perubahan tegangan yang diakibatkan oleh perubahan beban. Kapasitor seri juga dapat memperbaiki faktor daya sebagaimana kapasitor shunt, akan tetapi pemakaiannya masih sangat terbatas.

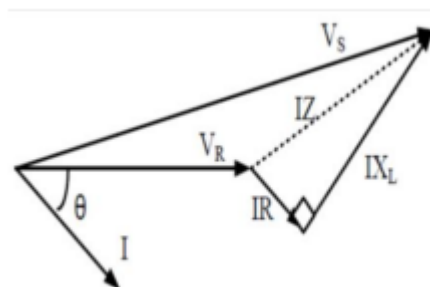
2.9.2 Pengaruh Kompensasi Beban Induktif Pada Rangkaian Seri

Dengan memasang kapasitor seri pada jaringan maka tegangan akan naik. Kenaikan tegangan pada kapasitor adalah sebagai fungsi dari arus. Perubahan tegangan tersebut adalah secara otomatis dan sesuai dengan perubahan arus. Dengan demikian kapasitor seri dapat juga dianggap sebagai suatu pengatur tegangan (Voltage regulator), akan tetapi berbeda dengan induction regulator. Perbedaannya adalah pada kapasitor seri tak dapat mengkompensasi perubahan tegangan yang terjadi pada sumber dan hanya dapat mengkompensasi perubahan II-19 tegangan yang diakibatkan oleh perubahan beban. Kapasitor seri juga dapat memperbaiki faktor daya sebagaimana kapasitor shunt, akan tetapi pemakaiannya masih sangat terbatas.



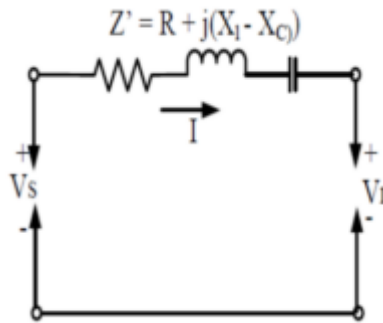
Gambar 2. 18 Rangkaian Ekuivalen Sebelum Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



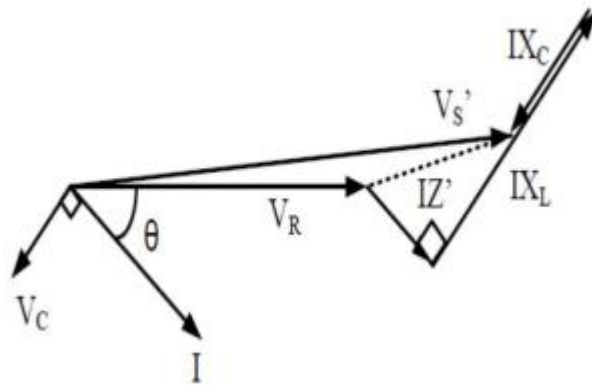
Gambar 2. 19 Diagram Vektor Sebelum Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



Gambar 2. 20 Rangkaian Ekuivalen Setelah Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



Gambar 2. 21 Diagram Vektor Setelah Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))

Pada rangkaian sebelum dipasang kapasitor. Jatuh tegangan pada penyulang tersebut dapat dinyatakan secara pendekatan sebagai berikut:

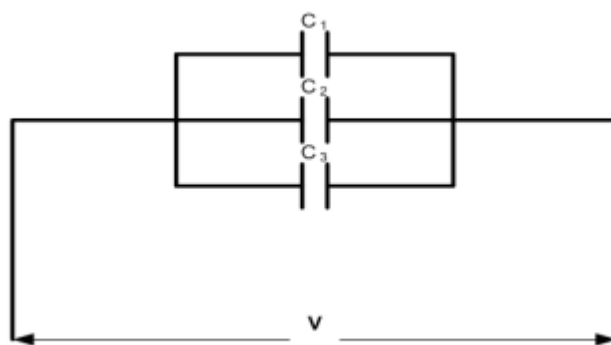
$$VD = IR + \cos\phi + IX_L \sin\phi \quad (2.29)$$

Hasil jatuh tegangan akibat dipasangnya kapasitor seri dapat dihitung sebagai berikut:

$$VD = IR \cos\phi + (X_L - X_C)\sin\phi \quad (2.30)$$

2.9.3 Kapasitor Shunt (Parallel)

Yang dimaksud dengan kapasitor shunt adalah suatu kapasitor yang terhubung paralel dengan jala – jala listrik. Fungsi dari kapasitor shunt ini adalah untuk memberikan daya reaktif yang diperlukan oleh beban – beban induktif seperti motor induksi dan lain – lain. Dengan pemberian daya reaktif oleh kapasitor shunt maka faktor daya dari beban induktif tersebut akan meningkat. Umumnya beban listrik itu bersifat induktif, sehingga arus yang ditariknya terbelakang terhadap tegangan, maka faktor dayanya akan mengecil. Pengaruh buruk dari faktor daya yang rendah adalah : a. Meningkatnya rugi–rugi listrik b. Menurunnya tegangan kerja c. Kapasitas pembebanan meningkat walaupun beban tetap konstan. Jika pada suatu rangkaian, arus reaktifnya diperkecil maka dengan kata lain arus total juga ikut mengecil. Dengan memperkecil arus reaktif maka faktor daya akan meningkat. Untuk memperbaiki faktor daya dengan memberikan kebutuhan daya reaktif beban maka diperlukan kapasitor, karena kapasitor dapat diasumsikan sebagai suatu pembangkit daya reaktif.



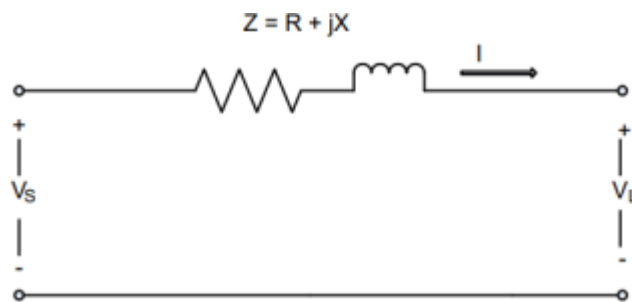
Gambar 2. 22 Rangkaian Kapasitor Hubungan Shunt (Parallel)

(Sumber : Ritonga, M. M. (2019).

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.31)$$

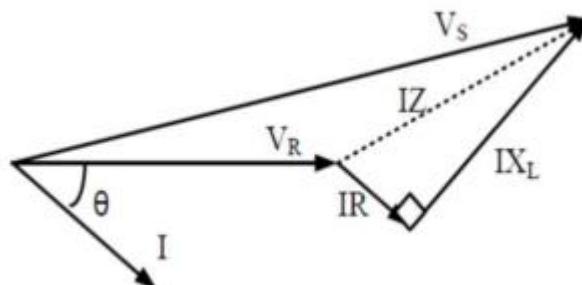
2.9.4 Pengaruh Kompensasi Beban Induktif Pada Rangkaian Paralel

Kompensasi beban induktif dilakukan guna meningkatkan kualitas daya, salah satunya adalah kerugian daya seminimal mungkin. Dalam hal ini, aliran daya reaktif dapat dikontrol dengan cara memasang peralatan kompensasi paralel pada bus beban untuk menjaga keseimbangan yang tepat antara daya reaktif yang dihasilkan dan daya reaktif yang digunakan. Cara ini dapat dikatakan efektif dalam meningkatkan stabilitas tegangan (Andita Noor Shafira, 2016). Kapasitor akan terhubung paralel pada jaringan dengan tujuan untuk mengurangi kerugian daya pada jaringan transmisi. Gambar menunjukkan bahwa dengan menggunakan kapasitor, maka arus reaktif yang mengalir pada saluran transmisi dapat berkurang sehingga kerugian daya dapat diminimalisir (Andita Noor Shafira, 2016).



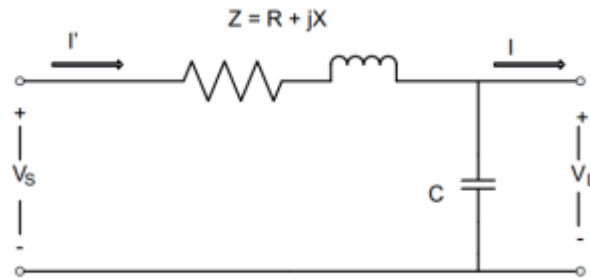
Gambar 2. 23 Rangkaian Ekuivalen Sebelum Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



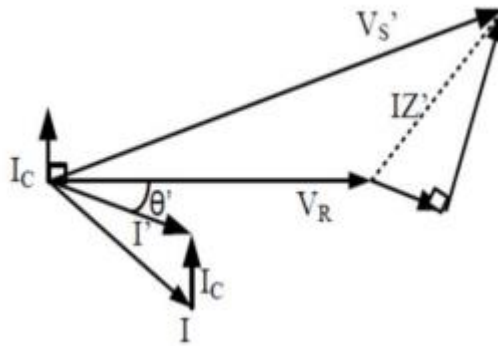
Gambar 2. 24 Diagram Vektor Sebelum Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



Gambar 2. 25 Rangkaian Ekivalen Setelah Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))



Gambar 2. 26 Diagram Vektor Setelah Dipasang Kapasitor

(Sumber: Ilham, M. (2017))

Sebelum Kapasitor Shunt dipasang pada ujung saluran, jatuh tegangan pada penyulang tersebut dapat dihitung:

$$VD = IR + \cos\phi + IX_L \sin\phi \quad (2.32)$$

$$VD = IR \cos\phi + (X_L - X_C) \sin\phi \quad (2.33)$$

$$VD = I_R R + I_X X_L \quad (2.34)$$

Bila Kapasitor dipasang pada ujung penerima dari saluran, secara pendekatan jatuh tegangan akan menjadi:

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \quad (2.35)$$

Perubahan jatuh tegangan sebelum dan sesudah dipasangnya kapasitor shunt dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$VD = I_C X_L \quad (2.36)$$

Dalam prakteknya tegangan kerja tidak benar - benar tepat dengan tegangan ratingnya walaupun masih dalam batas-batas yang diperbolehkan, sehingga daya reaktifnya sebenarnya yang dikeluarkan oleh kapasitor adalah:

$$C_{sebenarnya} = C_{rating} \left\{ \frac{Tegangan Operasi}{Tegangan Rating} \right\}^2 \quad (2.37)$$

Output kivolat kapasitor juga berbanding langsung dengan frekuensi tegangan yang diberikan, sehingga :

$$C_{sebenarnya} = C_{rating} \left\{ \frac{Frekuensi Operasi}{Frekuensi Rating} \right\}^2 \quad (2.38)$$

2.10 Sistem Pemasangan Kapasitor

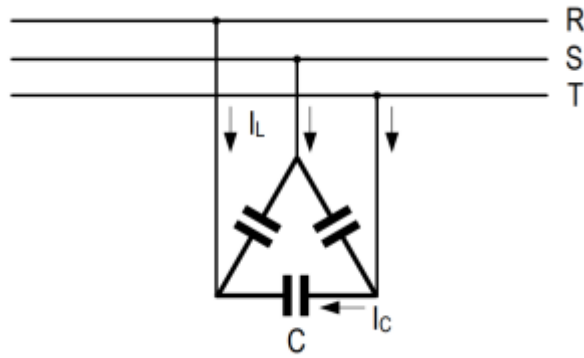
Umumnya ada dua cara sistem pemasangan kapasitor shunt pada sistem kelistrikan sebagai berikut (Azizul Hakim, 2020):

A. Sistem Delta

Sambungan delta kapasitor bank hanya digunakan pada tegangan rendah. Dikarenakan sambungan delta menjadi satu grup, keuntungannya overvoltage pada unit kapasitor tidak akan terjadi akibat ketidakseimbangan tegangan (Andrean Yudha Prasetya, 2017).

Pada sistem tiga fasa, rangkaian hubungan kapasitor dapat berupa hubung delta dan hubung bintang. Bila daya reaktif dari kapasitor tiga fasa diketahui , maka besarnya kapasitansi dari kapasitor dapat dihitung, baik hubungan delta maupun bintang. Berikut adalah gambar dari hubungan delta dan bintang :

1) Hubungan Delta



Gambar 2. 27 Kapasitor Bank Hubungan Delta
(Sumber: Azizul Hakim, 2020)

Pada rangkaian delta $I_c = I_L / \sqrt{3}$; $I_L = \sqrt{3} \times I_c$ & $V_c = V_L$, maka untuk menghitung besar kapasitansi kapasitor dapat dilakukan dengan cara, yaitu :

$$Q_C = \sqrt{3} \times I_L \times V_{L-L} \text{ (VAR)} \quad (2.39)$$

$$I_L = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} \text{ (A)} \quad (2.40)$$

Arus Kapasitif :

$$I_C = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \text{ (A)} \quad (2.41)$$

Reaktansi pada kapasitor :

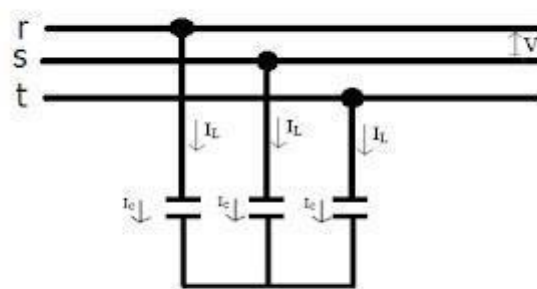
$$C = \frac{1}{2\pi \times f \times X_C} \quad (2.42)$$

Kelebihan pemasangan kapasitor dengan sistem delta adalah sebagai berikut:

- a. Efisiensi yang tinggi: sistem delta menghasilkan arus netral yang relatif rendah, sehingga mengurangi hilangnya daya pada penghantar netral. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

- b. Desain yang sederhana: sistem delta pada umumnya memiliki desain yang lebih sederhana dibandingkan dengan sistem wye. Hal ini dapat mengurangi biaya instalasi dan pemeliharaan.
 - a. Kekurangan pemasangan kapasitor dengan sistem delta adalah sebagai berikut :
- c. Tegangan fase-netral yang tinggi: sistem delta menghasilkan tegangan fase-netral yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem wye. Hal ini dapat membutuhkan kapasitor dengan rating tegangan yang lebih tinggi dan memerlukan perhatian lebih dalam hal isolasi dan keamanan.
- d. Kesulitan pemeliharaan: pada sistem delta, kapasitor bank terhubung langsung antara fase-fase sistem. Hal ini dapat menyulitkan pengujian, pemeliharaan, dan penggantian kapasitor secara individu.

2) Hubungan Bintang (Y)



Gambar 2. 28 Gambar Kapasitor Bank Hubungan Bintang (Y)
(Sumber: Azizul Hakim, 2020)

$$Q_C = \sqrt{3} \times I_C \times V_{L-N}(VAR) \quad (2.43)$$

$$V_{L-N} = \frac{V_{L-N}}{\sqrt{3}} \quad (2.44)$$

Arus Kapasitif :

$$I_C = I_L(A) \quad (2.45)$$

Reaktansi dari kapasitor :

$$X_C = \frac{V_{L-N}}{I_C}(\Omega) \quad (2.46)$$

Sehingga kapasitansi tiap unit kapasitor yang terhubung wye adalah :

$$C = \frac{1}{2\pi \times f \times X_C} (Farad) \quad (2.47)$$

Kelebihan pemasangan kapasitor dengan sistem wye adalah sebagai berikut:

- a. Tegangan fasa-netral yang rendah: sistem wye menghasilkan tegangan fasa-netral yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem delta. Hal ini dapat mengurangi resiko tegangan berlebih pada kapasitor bank dan memudahkan pengoperasian dan pemeliharaan.
- b. Pemeliharaan yang mudah: pada sistem wye, setiap kapasitor dapat dipasang secara terpisah pada garis netral. Hal ini dapat memungkinkan pengujian, pemeliharaan, dan penggantian kapasitor secara individu tanpa mempengaruhi operasi keseluruhan sistem.
- c. Perawatan yang mudah: ketika kapasitor bank dihubungkan dalam konfigurasi wye, kapasitor bank dapat dipasang secara terpisah pada garis netral. Hal ini dapat memudahkan pengukuran, penggantian dan perawatan kapasitor yang rusak tanpa mempengaruhi operasi sistem secara keseluruhan.

Kekurangan pemasangan kapasitor dengan sistem wye adalah sebagai berikut:

- a. Arus netral yang tinggi: sistem wye memiliki arus netral yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem delta. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan beban pada penghantar netral dan mempengaruhi desain dan ukuran sistem penghantar.
- b. Efisiensi yang rendah: sistem wye menghasilkan arus netral yang tinggi, yang mengakibatkan hilangnya daya pada penghantar netral. Hal ini dapat mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan.

2.11 Proses Kerja Kapasitor Bank

Untuk meningkatkan nilai faktor daya ($\cos\phi$) kapasitor dipasang paralel dengan beban. Apabila rangkaian diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan mengalir ke luar dari kapasitor dan mengalir ke dalam rangkaian yang memerlukannya, dengan demikian pada saat itulah kapasitor membangkitkan daya reaktif. Bila tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali electron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron (I_c) berarti sama dengan kapasitor menyuplai daya reaktif ke beban. Karena beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitor (-) akibatnya daya reaktif berlaku menjadi kecil. (Prayudi & Wiharja, 2006)

Rugi – rugi daya sebelum dipasang kapasitor yaitu :

$$\text{Rugi daya aktif} = I^2 \times R \text{ (Watt)} \quad (2.48)$$

$$\text{Rugi daya reaktif} = I^2 \times X_c \text{ (VAr)} \quad (2.49)$$

Rugi – rugi daya sesudah dipasang kapasitor yaitu :

$$\text{Rugi daya aktif} = (I^2 - I_c^2)R \text{ (Watt)} \quad (2.50)$$

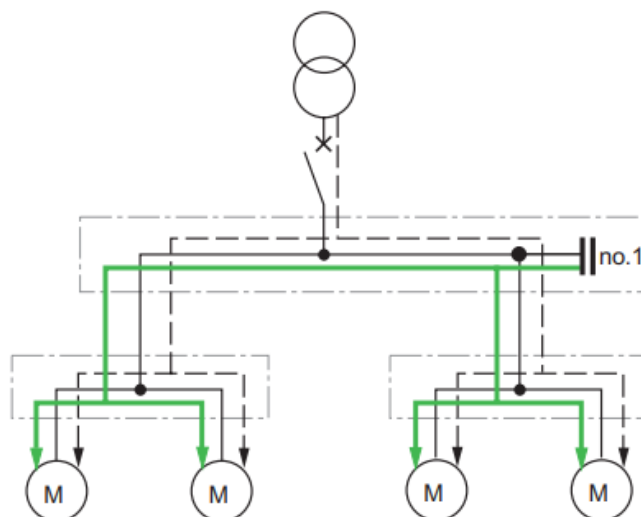
$$\text{Rugi daya reaktif} = (I^2 - I_c^2) \times X_c \text{ (VAr)} \quad (2.51)$$

2.11.1 Metode Pemasangan Kapasitor Bank

Dalam pemasangan instalasi kapasitor bank untuk kapasitas tegangan rendah dapat dibagi menjadi tiga cara, yaitu (Hajar & Rahayuni, 2020):

a. *Global Compensation*

Dengan menggunakan metode ini kapasitor bank dipasang di *Main Distribution Panel* (MDP). Arus reaktif yang mengalir dari pemasangan ini hanya di penghantar antara panel MDP dan transformator. (Hajar & Rahayuni, 2020) Oleh karena itu, rugi-rugi daya pada saluran tidak berkurang karena kapasitor bank hanya dapat mengurangi rugi daya pada transformator di atasnya (Rahmaan et al., 2016). Jika beban kontinu dan stabil, metode *global compensation* ini dapat diterapkan (Schneider Electric, 2018). Pemasangan kapasitor bank dengan menggunakan metode ini paling ekonomis bila dibandingkan dengan metode pemasangan lainnya. Tetapi kelemahan dari metode ini yaitu apabila beban yang terpasang sangat kecil maka akan terjadi tegangan lebih pada sistem. (Rahmaan et al., 2016)

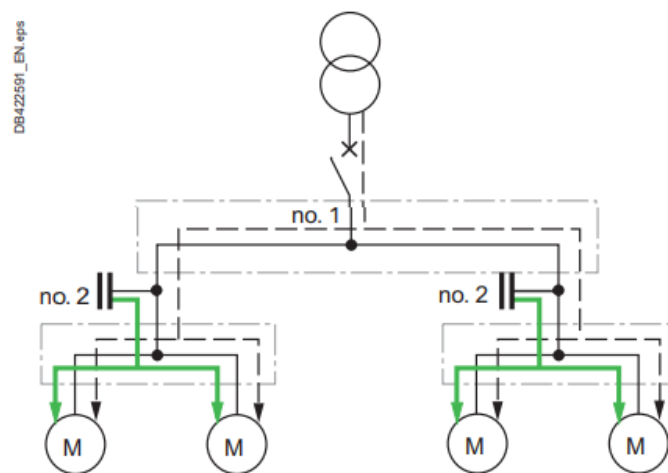


Gambar 2. 29 *Global Compensation*

Sumber: (Schneider Electric, 2018)

b. *Sectoral Compensation*

Pada metode ini, terdapat beberapa panel kapasitor yang dipasang di *Sub Distribution Panel* (SDP). Cara ini cocok diterapkan pada industri dengan kapasitas beban terpasang besar sampai ribuan KVA. (Hajar & Rahayuni, 2020) Kelemahan dari metode ini yaitu apabila terjadi perubahan besar pada beban, maka ada kemungkinan terjadi kelebihan kompensasi dan masalah tegangan berlebih (Schneider Electric, 2018).

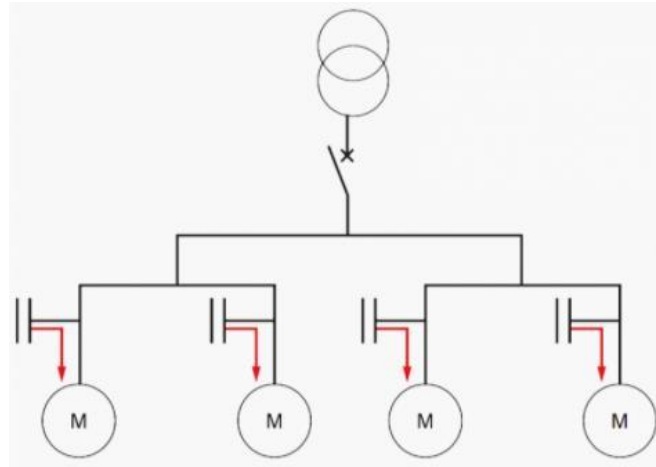


Gambar 2. 30 *Sectoral Compensation*

Sumber: (Schneider Electric, 2018)

c. *Individual Compensation*

Pada metode ini kapasitor langsung dipasang pada masing-masing beban khususnya yang mempunyai daya besar (Hajar & Rahayuni, 2020). Tetapi untuk pemasangan kapasitor menggunakan metode ini harus dipertimbangkan jika daya motor signifikan sehubungan dengan persyaratan daya (KVA) yang dinyatakan untuk instalasi (Schneider Electric, 2018). Sebenarnya metode ini lebih efektif dan lebih baik dari segi teknisnya. Namun untuk meletakkan kapasitor nya membutuhkan ruang atau tempat khusus yang dapat mengurangi nilai estetika. Selain itu total biaya yang diperlukannya juga lebih besar dari kedua metode diatas. (Hajar & Rahayuni, 2020)



Gambar 2. 31 *Individual Compensation*

Sumber: (Csanyi, 2017)

2.12 Perawatan Kapasitor

Untuk menjaga kapasitor bank tetap dalam kondisi yang baik dan tahan lama, serta berfungsi secara baik harus dilakukan perawatan secara rutin dan teratur. Untuk perawatan kapasitor bank sendiri terdapat pedoman pemeliharanya sebagai berikut (PT PLN (PERSERO), 2014):

2.12.1 *In Service Inspection*

In service inspection merupakan kegiatan pengamatan secara visual pada bagian-bagian peralatan terhadap adanya anomali yang berpotensi menurunkan unjuk kerja peralatan atau merusak sebagian/keseluruhan peralatan. Bagian-bagian kapasitor yang di inspeksi visual saat beroperasi ialah sebagai berikut:

- a. *Bushing*
 - 1) Kondisi *bushing* kapasitor
 - 2) Kondisi *clamp bushing*
 - 3) Kebocoran minyak *bushing*
- b. *Body Kapasitor*
- c. *Fuse Cut Out*

- 1) Kondisi *fuse/cut out* kapasitor
- 2) Kondisi *clamp fuse cut out*
- d. Sambungan/Klem/*Jumper*
 - 1) Kondisi mur baut-mur baut sambungan kapasitor
 - 2) Kondisi rel bar sambungan antar unit kapasitor
 - 3) Kondisi jumper antar kapasitor
 - 4) Kondisi sambungan rangkaian kapasitor ke CT/CVT
 - 5) Kondisi sambungan pentanahan
- e. *Mechanical Structure*
 - 1) Kondisi isolator support
 - 2) Kondisi serandang

2.12.2 In Service Measurement

In service measurement adalah kegiatan pengukuran yang dilakukan pada saat kapasitor sedang dalam keadaan bertegangan/operasi. Pengukuran suhu pada kapasitor dapat dilakukan dengan perangkat IR *thermometer* dan IR *thermography*. Bagian-bagian kapasitor yang perlu diukur suhunya yaitu sebagai berikut:

- 1) *Body* unit kapasitor
- 2) *Bushing*
- 3) Klem konduktor *bushing*
- 4) Klem-klem sambungan
- 5) *Fuse link*
- 6) Rel pengumpul arus

2.12.3 *Shutdown Testing/Measurement*

Shutdown testing/measurement adalah kegiatan pengujian/pengukuran yang dilakukan pada saat kapasitor dalam keadaan tidak beroperasi. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

- 1) Pengukuran tahanan isolasi kapasitor
- 2) Pengukuran resistansi AC kapasitor
- 3) Pengujian kapasitansi kapasitor
- 4) Pengujian *dissipation factor* (tangen delta)

2.12.4 Faktor keamanan kerja kapasitor bank berdasarkan standar IEEE std 18-2002

IEEE std 18-2002 ini berlaku untuk kapasitor dengan *rating* 216 V atau lebih tinggi, 2,5 kVAr atau lebih, dan dirancang untuk koneksi *shunt* ke sistem transmisi dan distribusi arus AC yang beroperasi pada frekuensi nominal 50 Hz atau 60 Hz (IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, 2002). Faktor keamanan kerja kapasitor sangat ditentukan kondisi kerja dari kapasitor tersebut apakah sesuai dengan nilai nominal arus dan tegangannya, sehingga kapasitor tidak cepat rusak (*long life time*) (Sucipto, 2017). Kapasitor dimaksudkan untuk dioperasikan pada atau dibawah tegangan pengenalnya. Kapasitor harus dapat beroperasi secara kontinyu di bawah sistem kontingensi dan dalam kondisi tidak melampaui batasan berikut (IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, 2002):

- a. 110% dari *rating* tegangan rms.

- b. 120% dari *rating* tegangan puncak (tegangan puncak tidak melebihi $1,2 \times$ (akar dari 2) $\times$ *rating* tegangan rms, termasuk harmonisa tetapi tidak termasuk transien.
- c. 135% dari arus nominal berdasarkan pada *rating* kVAr dan tegangannya.
- d. 135% dari *rating* kVAr.

2.13 Penelitian Terkait

Berdasarkan studi tentang monitoring suatu kondisi ruangan atau Gedung menggunakan sebuah modul komunikasi sudah banyak dilakukan. Beberapa penelitian yang signifikan dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Penelitian terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
1	Analisa Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Faktor Daya Gedung TI BRI Ragunan	Abdul Kodil Al Bahar	Gedung TI BRI Ragunan, 2017	Penelitian ini dilakukan di Gedung TI BRI Ragunan yang sudah terpasang kapasitor sebesar 1000 kVAr dengan tujuan untuk melihat pengaruh dari kapasitor bank terhadap faktor daya saat ini dan membandingkannya dengan faktor daya standar 0.85. penelitian ini menggunakan metode perhitungan segitiga daya dan dari penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar nilai faktor daya atau mendekati nilai 1, maka arus yang

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
				mengalir pada jaringan distribusi kelistrikan gedung akan semakin kecil.
2	Kajian Dampak Kelebihan Kompensasi Pada Sistem Perbaikan Faktor Daya Beban Tiga Fasa Tak Seimbang Dengan Menggunakan Kapasitor Bank	Hari Sucipto	Politeknik Negeri Malang, 2017	Penelitian ini dilakukan dengan cara pengukuran beban listrik yang dirancang dan ditentukan nilai-nilainya dengan menggunakan perangkat yaitu PM 810 dan dilakukan simulasi serta analisis data dengan tujuan untuk mengetahui kinerja kapasitor bank pada beban tidak seimbang. Ketika terjadi kelebihan kompensasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kinerja kapasitor bank pada beban tidak setimbang dapat menyebabkan kenaikan nilai arus nertal yang mana hal ini disebabkan karena kelebihan kompensasi.
3	Analisis Kebutuhan Capacitor Bank Beserta Implementasinya untuk Memperbaiki Faktor Daya Listrik Di Politeknik Kota Malang	Muhamad Fahmi Hakim	Politeknik Kota Malang, 2014	Penelitian ini membahas tentang faktor daya lagging yang mampu diharapkan mampu memperbaiki kualitas daya listrik dan mengurangi biaya tagihan listrik di Politeknik Kota Malang. Metode

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
				yang digunakan yaitu perhitungan terhadap daya reaktif yang dibutuhkan untuk mendapatkan faktor daya terbaik yaitu mendekati 1. Selanjutnya penentuan kapasitor bank yang akan digunakan dan dilakukan uji coba terhadap kapasitor bank tersebut. Dari pemasangan kapasitor bank tersebut meningkatkan faktor daya menjadi 0,96 lagging dan menurunkan daya reaktif menjadi 4,6 kVAr.
4	Analisa Pemasangan Kapasitor Untuk Meningkatkan Faktor Daya Pada Trafo 1 Di Hotel Melia Bali	I Kadek Satrya Angga Putra, I Made Suartika dan I Wayan Rinas	Hotel Melia Bali, 2020	Penelitian ini membahas mengenai analisis pemasangan kapasitor untuk meningkatkan faktor daya pada trafo 1 di Hotel Melia Bali. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu simulasi pemodelan dengan menggunakan software ETAP dan dari analisis pemasangan kapasitor tersebut dapat meningkatkan faktor daya sebesar 11% dari 0,84 lagging menjadi 0,95 lagging serta arus

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
				beban turun sebesar 12% dari 442,3 menjadi 389,5 A.
5	Pengaruh Penggunaan Kapasitor Bank Pada Penyulang Kota Di PT.PLN(Persero) Raya Meulaboh Kota	Haimi Ardiansyah	PT. PLN(Persero) Rayon Meulaboh Kota , 2020	Penelitian ini membahas tentang pengaruh dari penggunaan kapasitor bank pada penyulang kota di PT. PLN(Persero) Rayon Meulaboh Kota. Penggunaan kapasitor bank pada penyulang kota untuk memperbaiki faktor daya ini bertujuan untuk meningkatkan daya aktif agar mendekati daya semu yang di produksi PT. PLN(Persero). Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan membandingkan data hasil pengukuran yang dilakukan sebanyak 7 kali pada saat kapasitor bank hidup (on) dan mati (off).
6	Analisa Penggunaan Kapasitor Bank Dalam Upaya Perbaikan Faktor Daya	Ahmad Rofii dan Rijon Ferdinan	2018	Penelitian ini dilakukan dengan pengumpulan data secara langsung dilapangan dan melakukan analisa pada kapasitor bank yang sudah terpasang. Metode yang dilakukan yaitu rekapitulasi daya dengan

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
				memperhitungkan penyerapan daya reaktif oleh beban yang ditunjukkan dengan nilai cosphi dan besar arus dan tegangan yang terjadi setiap minggu kemudian di bandingkan dengan daya semu yang diserap oleh beban setiap jam, satu hari dan dalam seminggu.
7	Pengaruh Penambahan Kapasitor Terhadap Tegangan, Arus, Faktor Daya, dan Daya Aktif Pada Beban Listrik di Minimarket	Fachry Azharuddin Noor, Henry Anantam dan Said Sunardiyo	Minimarket Micromart, 2017	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan kapasitor daya pada beban – beban induktif yang ada di minimarket terhadap kualitas listrik. Metode penelitian ini yaitu metode eksperimen yang diawali dengan perancangan kapasitor daya, menentukan titik beban pemasangan kapasitor daya dan pengukuran kelistrikan yang diteliti setelah dilakukan pemasangan kapasitor. Hasil dari penambahan kapasitor bank yang terpasang pada beban listrik minimarket terbukti berpengaruh

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan tahun penelitian	Kesimpulan
				terhadap arus dan faktor daya beban listrik.

Dari hasil pembahasan penelitian pada tabel 2.4 mengamati pengaruh penggunaan kapasitor bank serta perbaikan faktor daya, penelitian sebelumnya kebanyakan membahas pemasangan dan menghitung kebutuhan kapasitor bank untuk meningkatkan nilai faktor daya lagging. Sehingga yang membedakan dengan penelitian yang dilakukan yaitu pengaruh dari evaluasi kapasitas kapasitor bank yang sudah terpasang tersebut apakah masih layak dipakai atau sudah memenuhi standar yang sudah ada di PUIL atau tidak.