

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Kapasitor



Gambar 2.1 Kapasitor

Kapasitor yang ditunjukkan pada gambar 2.1 adalah komponen pasif dalam elektronika yang mampu menyimpan dan melepaskan energi listrik dalam bentuk medan listrik. Kapasitor terdiri dari dua pelat yang terpisah oleh bahan dielektrik. Bahan dielektrik ini dapat berupa udara, plastik, kertas, atau bahan lainnya. Kapasitor memiliki kemampuan untuk menyimpan muatan listrik di antara pelat-pelatnya dan melepaskannya saat diperlukan.

2.1.1. Karakteristik Kapasitor

- a. Kapasitansi: Kapasitansi kapasitor diukur dalam Farad (F). Kapasitansi menunjukkan sejauh mana kapasitor dapat menyimpan muatan listrik. Semakin besar kapasitansi, semakin besar jumlah muatan yang dapat disimpan oleh kapasitor dengan mengikuti persamaan berikut:

$$C = Q/V \quad (2.1)$$

Dimana:

C = kapasitansi (Farad)
Q = muatan listrik (coulomb)
V = tegangan (volt)

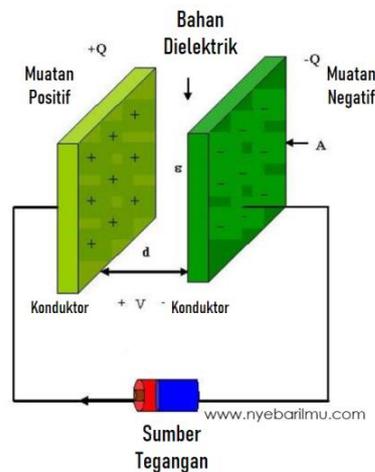
- b. Tegangan Kerja Maksimum: Setiap kapasitor memiliki batasan tegangan maksimum yang dapat ditangani. Melebihi batas tegangan ini dapat menyebabkan kerusakan pada kapasitor.
- c. Waktu Muat dan Waktu Lepas: Kapasitor membutuhkan waktu untuk mengisi atau membongkar muatan listriknya. Waktu ini dapat dipengaruhi oleh kapasitansi dan resistansi rangkaian.

$$V = V_0 e^{-t/RC} \quad (2.2)$$

Dimana:

V = tegangan akhir(volt)
V₀ = tegangan awal (volt)
e = nilai euler (2,7182818)
t = waktu pengisian/pengosongan (detik)
R = resistansi (ohm)
C = kapasitansi (Farad)

2.1.2. Cara Kerja Kapasitor



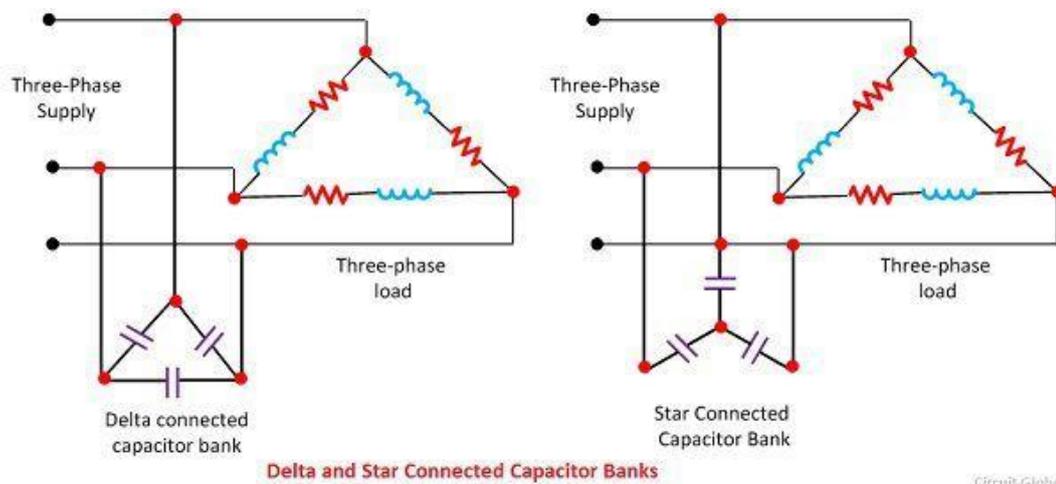
Gambar 2.2 Diagram Kapasitor

Pada gambar 2.2 menjelaskan ketika kapasitor terhubung dengan sumber tegangan, muatan listrik mulai mengalir ke salah satu pelat kapasitor melalui sirkuit. Proses ini terjadi hingga tegangan kapasitor menjadi sama dengan tegangan sumber listriknya. Pengisian ini mengikuti persamaan 2.2.

Ketika sumber tegangan dilepas, kapasitor akan mulai melepaskan muatan yang disimpannya ke dalam rangkaian. Kapasitor dapat berperan dalam berbagai aplikasi, seperti penyimpanan energi dalam sirkuit daya, penyaringan sinyal, dan perbaikan faktor daya.

2.1.3. Hubungan Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya

Penggunaan kapasitor daya pada sistem kapasitor bank dihubungkan secara *Star* (bintang) dan adapula secara *Delta* (segitiga). Penerapan diantara kedua jenis hubungan tersebut disesuaikan dengan maksud tertentu seperti sistem tegangan, nilai kVAR, fungsi proteksi seperti pendeteksian ketika kapasitor rusak dan lain sebagainya.



Gambar 2.3 Hubungan Kapasitor Delta dan Star

Kapasitor Bank yang kapasitornya dihubungkan secara *delta* (ditunjukkan pada gambar 2.3 sebelah kiri) umumnya banyak diterapkan pada sistem tegangan rendah (*low voltage*) biasanya pada tegangan 380 VAC. Namun kapasitor dengan hubungan delta juga bisa diterapkan pada tegangan *medium voltage* (> 1 kV). Penetapan hubungan delta pada sistem *low voltage* adalah pada pertimbangan faktor ekonomis. Dimana harga sebuah kapasitor dengan nilai kapasitansi yang sama akan menjadi lebih mahal ketika nilai rating tegangannya lebih tinggi. Ketika kapasitor terhubung secara *delta*, kedua terminal dari sebuah kapasitor tersebut terhubung secara fasa ke fasa ketegangan sistem. Sehingga ketika dihubungkan ke supply, tegangan yang ada pada ke dua terminal kapasitor adalah misalkan 380 VAC. Dan apabila hubungan ini diterapkan pada tegangan di atasnya (> 1 kV, *medium voltage*), maka dibutuhkan kapasitor yang besaran tegangannya harus sama dengan nilai tegangan fasa ke fasa sistem tersebut. Sehingga apabila digunakan pada *medium voltage* dengan nilai 6.3 kV atau 20 kV, maka kapasitas tegangan

kapasitor tersebut haruslah pada 6.3 kV sehingga dari sisi ekonomis tentu saja lebih mahal.

Untuk pertimbangan diatas, maka untuk tegangan medium (>1 kV) hubungan kapasitor lebih baik digunakan hubungan *Star*. Karena, ketika terhubung *Star*, kedua terminal kapasitor tersebut terhubung ke fasa dan satunya lagi ke netral. Pada tegangan medium, misalkan supply 6.3 kV yang terhubung ke kapasitor adalah fasa dan netral, sehingga nilainya adalah $1/\sqrt{3}$ dari tegangan fasa ke fasa, dan pada contoh ini adalah $6,3 \text{ kV}/\sqrt{3}$ sehingga nilainya menjadi 3.63 kV.

Rating tegangan kapasitor yang digunakan tidak harus 6.3 kV, melainkan cukup pada tegangan 3.63 kV. Hal ini tentu saja lebih ekonomis dibanding tetap menggunakan hubungan delta pada *medium voltage*.

Penyesuaian hubungan *Delta* dan *Star* pada rating tegangan tertentu disamping menguntungkan dari sisi ekonomis, berdampak juga terhadap perubahan nilai kVAR kapasitor tersebut.

Rumus menghitung nilai kVAR (Q) kapasitor terhubung Delta:

$$Q = \frac{2}{3} (C_a + C_b + C_c) 2\pi f U_N^2 * 10^{-9} \quad (2.3)$$

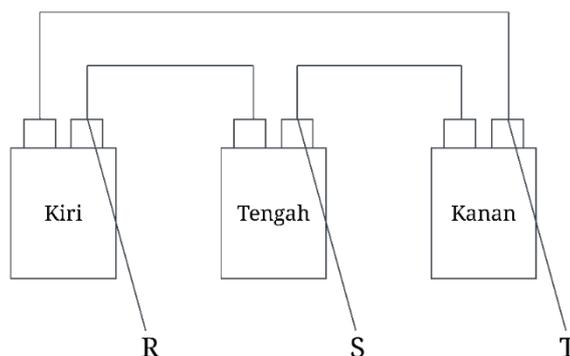
Dimana:

- Q = daya reaktif (kVAR)
- C = kapasitansi (micro Farad)
- f = frekuensi sistem (Hertz)
- U_N = tegangan (volt)

2.1.4. Pengukuran Kapasitansi Antar Terminal Fasa Pada Rangkaian *Delta*

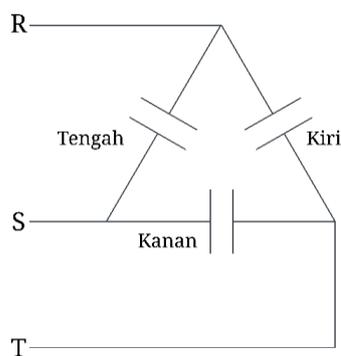
Pengukuran kapasitansi idealnya harus mengukur kapasitor satu per satu. Namun kapasitansi juga dapat diukur menggunakan alat LCR meter pada pasangan terminal fasa untuk mendapatkan hasil estimasi pengukuran:

- Terminal R dan S (C_{RS})
- Terminal S dan T (C_{ST})
- Terminal T dan R (C_{TR})



Gambar 2.4 Diagram Kapasitor

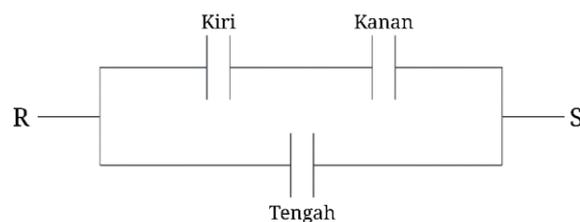
Gambar 2.4 menunjukkan diagram kapasitor perbaikan faktor daya pada umumnya. Kapasitor terdiri dari tiga *cup* yang saling berhubungan membentuk rangkaian *delta*. Kapasitor kiri adalah *cup* kapasitor yang posisinya di kiri unit keseluruhan, dan begitupun seterusnya untuk kapasitor tengah dan kapasitor kanan. Jika *probe* LCR meter dihubungkan ke terminal R dan S, maka akan didapatkan C_{RS} , dan begitupun seterusnya untuk C_{ST} dan C_{TR} .



Gambar 2.5 Diagram Rangkaian Kapasitor

Gambar 2.5 adalah diagram rangkaian kapasitor. *Cup* kiri kapasitor berhubungan dengan fasa R dan T. *Cup* tengah kapasitor berhubungan dengan fasa R dan S. *Cup* kanan kapasitor berhubungan dengan fasa S dan T. Kapasitansi yang terukur merupakan kapasitansi ekuivalen antar dua fasa dalam konfigurasi *delta*, yang melibatkan kombinasi ketiga kapasitor.

Ketika menggunakan LCR meter untuk mengukur kapasitansi kapasitor tiga fasa yang terhubung *delta*, dengan *probe* pada pasangan terminal fasa, kapasitansi yang terukur bukanlah kapasitansi satu kapasitor tunggal, melainkan kapasitansi ekuivalen antar dua fasa yang melibatkan semua kapasitor dalam konfigurasi *delta*.



Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Kapasitor Konfigurasi Delta

Gambar 2.6 menunjukkan diagram rangkaian ekuivalen jika *probe* LCR meter dihubungkan dengan fasa R dan S. Dapat dilihat bahwa pengukuran pada fasa R dan S tidak hanya mengukur kapasitansi kapasitor *cup* tengah, namun juga mengukur kapasitansi kapasitor kiri dan tengah seperti pada gambar 2.6.

Pengukuran ini mengikuti rumus:

$$C_{RS} = C_{tengah} + \frac{C_{kiri} * C_{kanan}}{C_{kiri} + C_{kanan}}$$

Demikian pula untuk pengukuran antara terminal lainnya:

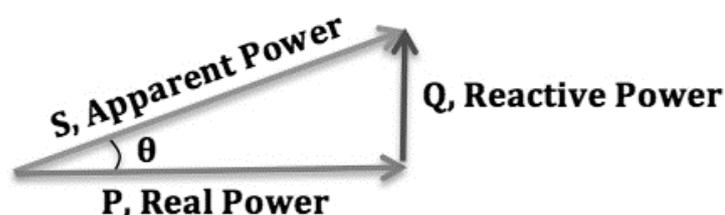
$$C_{ST} = C_{kanan} + \frac{C_{kiri} * C_{tengah}}{C_{kiri} + C_{tengah}}$$

$$C_{TR} = C_{kiri} + \frac{C_{tengah} * C_{kanan}}{C_{tengah} + C_{kanan}}$$

Sistem ini terdiri dari tiga persamaan dengan tiga variabel. Dengan menggunakan sistem persamaan tersebut, kapasitansi individual dapat dihitung dengan bantuan program komputer. Batas nilai C dari 0 sampai nilai kapasitansi nominal kapasitor berdasarkan spesifikasi. Jika nilai kapasitansi tunggal kapasitor mendekati 0 μ F, dapat diasumsikan bahwa kapasitor tersebut sudah mati total atau sekering internal kapasitor putus.

2.2. Daya, Segitiga Daya dan Faktor Daya

Daya adalah salah satu konsep penting dalam sistem listrik yang menggambarkan jumlah energi yang digunakan atau dihasilkan oleh suatu perangkat atau sistem. Dalam konteks listrik, daya dapat dijelaskan sebagai tingkat energi yang dikonsumsi atau diubah oleh perangkat elektronik. (Basudewa, 2020).



Gambar 2.7 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah representasi geometris dari hubungan antara tiga komponen penting dalam sistem listrik. Bagian-bagiannya dapat dilihat pada Gambar 2.4 yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Segitiga ini digambarkan dalam diagram segitiga dengan panjang sisinya mewakili besarnya masing-masing komponen daya.

$$S^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

dimana:

- S = daya semu (volt-Ampere)
- P = daya aktif (Watt)
- Q = daya reaktif (volt-Ampere Reaktif)

Daya aktif (P) adalah daya yang benar-benar digunakan atau diubah oleh perangkat elektronik dalam sistem listrik. Daya ini diukur dalam watt (W) dan menghasilkan pekerjaan yang berguna seperti penerangan, pemanasan, atau penggerak motor. Daya reaktif (Q) adalah daya yang dibutuhkan oleh perangkat dalam sistem listrik untuk menghasilkan medan elektromagnetik yang memungkinkan aliran energi bolak-balik. Daya reaktif diukur dalam volt-ampere

reaktif (VAR). Daya semu (S) adalah jumlah total daya yang menggabungkan daya aktif dan daya reaktif. Daya semu diukur dalam volt-ampere (VA).

Faktor daya (*power factor*) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dengan daya semu (S). Faktor daya menunjukkan sejauh mana daya yang disampaikan oleh sumber listrik benar-benar digunakan secara efisien oleh perangkat elektronik. Faktor daya dapat bernilai antara 0 hingga 1, di mana nilai 1 menunjukkan penggunaan daya yang efisien, sementara nilai mendekati 0 menunjukkan penggunaan daya yang tidak efisien (Barlian dkk., 2020).

$$PF = P/S = \cos \theta \quad (2.5)$$

dimana:

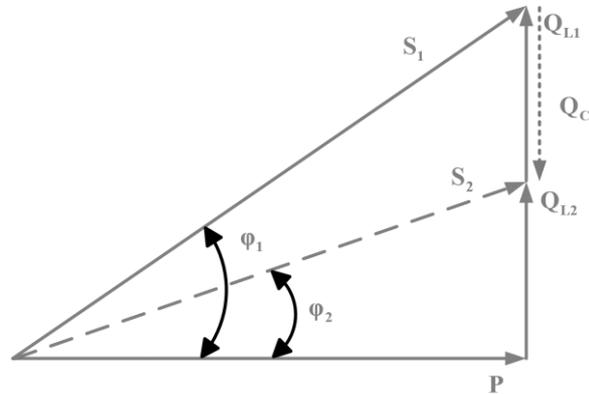
- PF = faktor daya
- P = daya aktif (Watt)
- S = daya semu (volt-Ampere)
- θ = sudut segitiga daya

Faktor daya yang mendekati nilai 1 sangat penting dalam sistem listrik karena dapat mengurangi pemborosan daya dan meningkatkan efisiensi. Ketika faktor daya rendah, tegangan dan arus yang dibutuhkan oleh perangkat akan meningkat, menyebabkan kerugian energi dalam sistem listrik. Ini dapat mengakibatkan peningkatan biaya operasional dan penurunan kualitas catu daya (Barlian dkk., 2020).

2.3. Perbaikan Faktor Daya

Salah satu cara untuk meningkatkan faktor daya adalah dengan menggunakan peralatan yang disebut koreksi faktor daya (*power factor correction*). Koreksi faktor daya melibatkan penggunaan kapasitor yang dapat menghasilkan daya reaktif

yang diperlukan oleh perangkat, sehingga mengurangi beban pada sistem dan meningkatkan faktor daya keseluruhan.



Gambar 2.8 Perbaikan Faktor Daya

Untuk menghitung perbaikan faktor daya, ada beberapa data yang diperlukan. Data yang dibutuhkan berdasarkan Gambar 2.5 adalah daya aktif (P), faktor daya lama ($\cos \varphi_1$) dan faktor daya baru ($\cos \varphi_2$). Daya semu lama dapat diperoleh dari persamaan :

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} \quad (2.6)$$

dimana :

- S_1 = daya semu lama (volt-Ampere)
- P = daya aktif (Watt)
- $\cos \varphi_1$ = faktor daya lama

Daya reaktif dari PF lama dan PF baru diperoleh dari persamaan :

$$Q_{L1} = P \tan \varphi_1 \quad (2.7)$$

$$Q_{L2} = P \tan \varphi_2 \quad (2.8)$$

dimana :

- Q_{L1} = daya reaktif lama (VAR)
- Q_{L2} = daya reaktif baru (VAR)
- $\cos \varphi_1$ = faktor daya lama

Daya reaktif yang dikompensasi oleh kapasitor bank adalah :

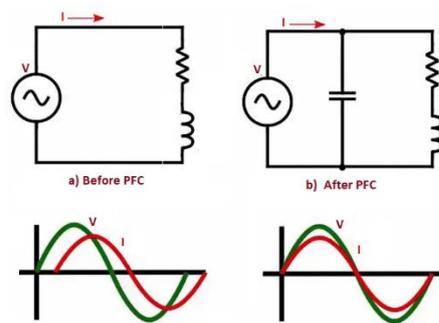
$$Q_C = Q_{L1} - Q_{L2} \quad (2.9)$$

dimana :

Q_C = Daya yang dikompensasi kapasitor (kVAR)

2.3.1. Kapasitor Daya

Kapasitor daya, juga dikenal sebagai kapasitor koreksi faktor daya, adalah kapasitor yang digunakan untuk meningkatkan faktor daya dalam sistem listrik. Kapasitor daya digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif dan meningkatkan faktor daya dengan menghasilkan daya reaktif yang berlawanan fasa dengan daya reaktif induktif pada beban.



Gambar 2.9 Pergeseran Fasa

Gambar 2.6 menunjukkan grafik tegangan yang sebelum perbaikan faktor daya dan sesudah. Perbaikan faktor daya membuat grafik menjadi sefasa.

2.3.2. Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah kelompok kapasitor yang terhubung secara paralel untuk meningkatkan kapasitansi keseluruhan (Prasetyo, 2022). Dalam kapasitor bank, kapasitor-kapasitor individu dihubungkan bersama-sama untuk membentuk kapasitansi yang lebih besar. Hal ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan kapasitansi yang lebih besar. Hal ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan kapasitansi yang lebih tinggi dalam aplikasi yang membutuhkan koreksi faktor daya

yang besar, seperti industri besar, gedung perkantoran, atau fasilitas komersial lainnya.



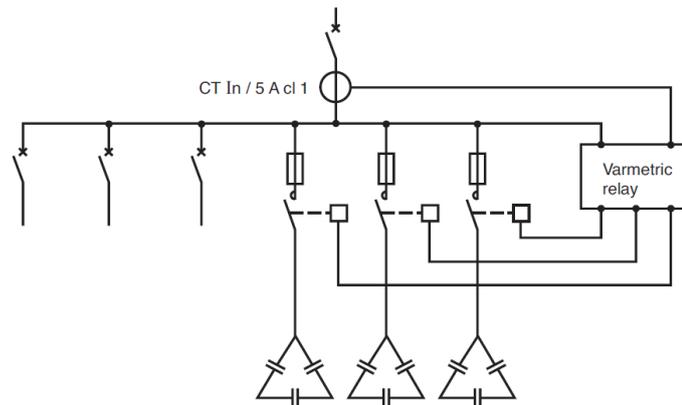
Gambar 2.10 Kapasitor Bank

Kapasitor bank umumnya dikendalikan oleh sistem kendali otomatis yang memonitor faktor daya dan mengaktifkan atau menonaktifkan kapasitor sesuai kebutuhan. Gambar 2.7 menunjukkan contoh suatu kapasitor bank. Dapat dilihat bahwa kapasitor bank merupakan lemari yang memiliki banyak kapasitor dan sistem kontrolnya, serta sistem pendingin dan proteksi harmonisa.

2.3.3. APFC

Automatic Power Factor Correction (APFC) atau Koreksi Faktor Daya Otomatis adalah sistem yang digunakan untuk secara otomatis mengendalikan kapasitor daya dan mempertahankan faktor daya yang optimal dalam suatu sistem

listrik (Zaidi & Ali, 2018). Sistem APFC mengukur faktor daya secara terus-menerus dan mengatur kapasitor daya secara otomatis untuk meningkatkan faktor daya ke tingkat yang diinginkan. Hal ini dilakukan dengan mengaktifkan atau menonaktifkan kapasitor daya dalam kapasitor bank berdasarkan permintaan faktor daya.



Gambar 2.11 Rangkaian Sistem Kapasitor Bank

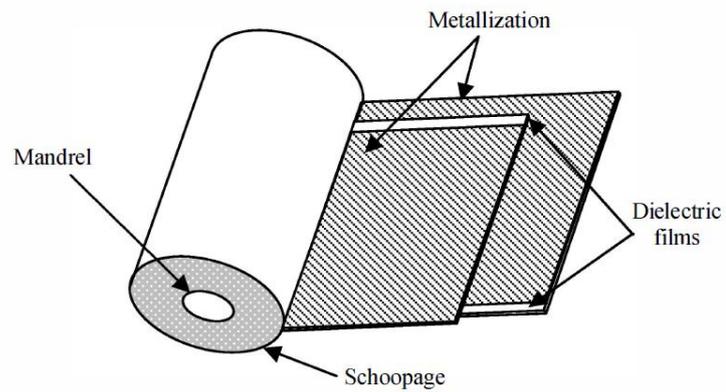
Sistem APFC mengoptimalkan penggunaan energi listrik dengan mengurangi daya reaktif yang harus dibebankan pada sistem dan dengan demikian meningkatkan efisiensi sistem listrik secara keseluruhan. Gambar 2.8 menunjukkan bahwa relay mengontrol tersambung atau tidaknya kapasitor ke sistem. Biasanya dihubungkan ke sebuah kontaktor.

2.4. *Self-healing* Metallized Capacitor

Salah satu kapasitor yang paling sering digunakan untuk perbaikan faktor daya adalah *Self-healing* metallized capacitor. Ini merupakan jenis kapasitor film yang menggunakan lapisan logam tipis (*metallized layer*) sebagai elektroda yang dideposisikan pada permukaan dielektrik. Kemampuan *self-healing*

memungkinkan kapasitor ini tetap berfungsi dengan baik meskipun terjadi kerusakan pada sebagian kecil lapisan dielektrik akibat lonjakan tegangan atau gangguan lainnya.

2.4.1. Struktur Dasar



Gambar 2.12 Struktur Dasar MPPC

Komponen utama dari *self-healing* metallized capacitor adalah:

1. Lapisan Dielektrik: Material isolator yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik. Polipropilena (PP) sering digunakan sebagai bahan karena memiliki stabilitas termal tinggi dan rugi daya rendah.
2. Lapisan Logam (*Metallized Layer*): Elektroda berupa lapisan logam tipis (umumnya aluminium atau seng) yang dideposisikan pada permukaan dielektrik melalui proses vakum. Ketebalan lapisan ini sekitar 20-50 nm. Agar lapisan ini terhubung dengan sirkuit eksternal, digunakan teknik *Schooping*.
3. Struktur Gulungan: Lapisan dielektrik dan logam digulung bersama di atas isolator dasar yang disebut *Mandrel* untuk membentuk elemen kapasitif yang kompak.

2.4.2. Material Utama

Polipropilena (PP): Memiliki konstanta dielektrik rendah sekitar 2,2 sampai 2,3, yang memastikan rugi daya minimal (faktor rugi sebesar 0,0002 pada 1 kHz). Bahan ini mampu beroperasi hingga suhu 105°C tanpa degradasi signifikan.

Aluminium atau Seng: Digunakan untuk lapisan logam karena sifat konduktivitasnya yang tinggi serta kemampuan menguap dengan cepat selama proses *self-healing*.

2.4.3. Prinsip Kerja *Self-healing*

Prinsip kerja *self-healing* metallized capacitor melibatkan mekanisme pemutusan area yang mengalami kerusakan tanpa mempengaruhi fungsi keseluruhan kapasitor. Proses ini terjadi secara otomatis dalam beberapa tahap berikut:

1. Kerusakan Lokal pada Dielektrik:

Ketika tegangan kerja kapasitor melebihi batas toleransi dielektrik, arus listrik dapat menyebabkan pelepasan (*discharge*) pada titik lemah dielektrik. Pelepasan ini menciptakan panas yang sangat tinggi dalam waktu singkat (beberapa nanodetik hingga mikrodetik).

2. Penguapan Logam Elektroda:

Panas yang dihasilkan oleh pelepasan menyebabkan lapisan logam elektroda di sekitar titik kerusakan menguap. Proses penguapan ini menciptakan zona kecil yang tidak lagi konduktif, sehingga arus tidak dapat lagi melewati area tersebut.

3. Pembentukan Zona Isolasi:

Area yang menguap menjadi zona isolasi listrik. Luas zona ini biasanya hanya beberapa mikrometer, sehingga tidak mempengaruhi elemen kapasitif utama secara signifikan.

4. Pemulihan Fungsi Kapasitor:

Setelah proses *self-healing* selesai, kapasitor kembali beroperasi normal tanpa adanya risiko korsleting atau degradasi performa yang besar. Pengurangan kapasitansi akibat isolasi area kerusakan biasanya kurang dari 0,01% dari total kapasitansi.

2.4.4. Karakteristik *Self-healing* Metallized Capacitor

1. Stabilitas Termal

Polipropilena sebagai bahan dielektrik memiliki kemampuan bertahan pada suhu hingga 105°C, dengan perubahan kapasitansi kurang dari 2%

bahkan setelah pengoperasian selama 10.000 jam. Stabilitas ini membuatnya ideal untuk aplikasi dengan kondisi lingkungan yang bervariasi.

2. Rugi Daya Rendah

Rugi daya pada kapasitor ini sangat rendah, dengan faktor rugi (*loss tangent*) sekitar 0,0002 pada 1 kHz. Hal ini memastikan efisiensi tinggi dan mengurangi panas yang dihasilkan dalam operasi jangka panjang.

3. *Self-healing*

Kemampuan *self-healing* memungkinkan kapasitor tetap berfungsi meskipun terjadi hingga ribuan siklus kerusakan lokal selama masa pakainya. Pada pengujian dengan tegangan 150% dari tegangan nominal, penurunan kapasitansi setelah 1 juta siklus hanya sekitar 0,5%.

2.4.5. Keunggulan *Self-healing* Metallized Capacitor

1. Reliabilitas Tinggi:

Kemampuan memperbaiki kerusakan lokal membuat kapasitor ini tahan terhadap gangguan seperti lonjakan tegangan. Hal ini meningkatkan keandalan dalam aplikasi sistem daya.

2. Dimensi:

Dengan elektroda logam yang sangat tipis (20-50 nm), kapasitor ini memiliki ukuran kecil untuk nilai kapasitansi tertentu dibandingkan kapasitor dengan elektroda konvensional.

3. Keamanan Operasi:

Proses *self-healing* mencegah kegagalan total akibat korsleting, yang sering terjadi pada kapasitor tanpa teknologi ini.

4. Umur Panjang:

Dalam kondisi operasi standar, *self-healing* metallized capacitor memiliki umur pakai lebih dari 100.000 jam.

2.4.6. Kekurangan *Self-healing* Metallized Capacitor

1. Penurunan Kapasitansi Bertahap:

Setiap proses *self-healing* sedikit mengurangi luas permukaan elektroda yang aktif, menyebabkan kapasitansi berkurang secara bertahap. Pengurangan ini, meskipun kecil, dapat memengaruhi performa jika terjadi terlalu sering.

2. Batas Tegangan Kerja:

Self-healing metallized capacitor umumnya dirancang untuk tegangan kerja hingga 630 V DC. Untuk aplikasi dengan tegangan yang lebih tinggi, perlu digunakan kapasitor khusus dengan lapisan isolasi yang lebih tebal.

2.5. Beban Linear dan Non-Linear

Beban dalam sistem kelistrikan merujuk pada perangkat atau komponen yang mengkonsumsi energi listrik untuk beroperasi. Beban ini dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat aliran arus dan tegangan menjadi dua jenis utama, yaitu beban linear dan beban non-linear

2.5.1. Beban Linear

Beban linear adalah jenis beban di mana hubungan antara arus dan tegangan bersifat linier, mengikuti hukum Ohm. Pada beban ini, bentuk gelombang arus yang mengalir memiliki bentuk yang sama dengan gelombang tegangan.

1. Karakteristik Beban Linear

- Hubungan Linier: Arus yang mengalir proporsional terhadap tegangan yang diterapkan.
- Distorsi Gelombang Minimal: Tidak ada distorsi harmonisa yang signifikan.
- Impedansi Tetap: Beban memiliki impedansi konstan selama operasi.

2. Contoh Beban:

- Peralatan pemanas (*heater*).
- Lampu pijar.
- Motor listrik induksi tanpa drive frekuensi variabel (VFD).

Beban ini sering dianalisis menggunakan pendekatan sinusoidal sederhana, tanpa memerlukan teknik tambahan untuk mengatasi masalah harmonisa. Pada sistem daya dengan beban linear dominan, efisiensi operasi relatif lebih tinggi, dan kualitas daya cenderung stabil.

2.5.2. Beban Non-Linear

Beban non-linear adalah jenis beban di mana hubungan antara arus dan tegangan tidak bersifat linier. Hal ini menyebabkan distorsi bentuk gelombang arus akibat adanya komponen harmonisa.

1. Karakteristik Beban Non-Linear

- Hubungan Tidak Linier: Arus yang mengalir tidak sebanding dengan tegangan yang diterapkan.
- Distorsi Gelombang: Arus yang ditarik dari sumber memiliki gelombang yang terdistorsi.

- Pembangkitan Harmonisa: Beban ini menghasilkan harmonisa yang dapat mengganggu kualitas daya.

2. Contoh Beban:

- Perangkat elektronik berbasis semikonduktor (*inverter, rectifier, converter*).
- Lampu fluoresen dengan ballast elektronik.
- Komputer, UPS, dan perangkat berbasis daya terdistribusi.

Beban non-linear memerlukan analisis yang lebih kompleks, melibatkan studi harmonisa menggunakan transformasi Fourier atau perangkat analisis kualitas daya. Perangkat seperti filter harmonisa sering digunakan untuk memitigasi efek negatifnya.

2.5.3. Dampak Beban Non-Linear pada Sistem Kelistrikan

Beban non-linear dapat menimbulkan beberapa dampak negatif pada sistem kelistrikan, antara lain:

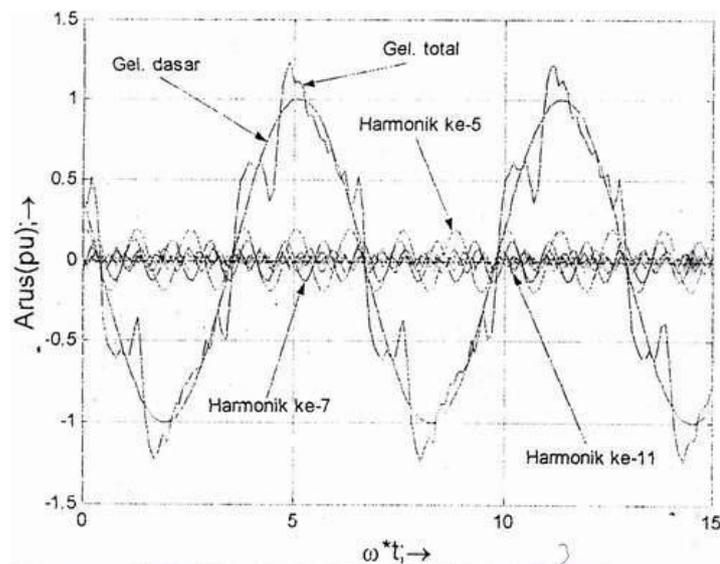
- Penurunan Faktor Daya: Harmonisa yang dihasilkan mengurangi efisiensi sistem.
- Overheating pada Transformator: Harmonisa meningkatkan rugi-rugi inti dan tembaga pada transformator.
- Gangguan pada Peralatan Lain: Harmonisasi dapat menyebabkan kegagalan atau gangguan pada perangkat sensitif.
- Kerugian Daya Tambahan: Harmonisasi memperbesar rugi-rugi daya dalam saluran distribusi.

Untuk mengatasi dampak negatif dari beban non-linear, beberapa solusi teknis dapat diterapkan, seperti:

- Penggunaan Filter Harmonisa: Filter pasif atau aktif untuk mengurangi harmonisa.
- Kompensasi Daya Reaktif: Menggunakan perangkat seperti kapasitor atau SVC (*Static VAR Compensator*).
- Desain Sistem yang Optimal: Memperhatikan aspek kualitas daya dalam desain sistem kelistrikan.

2.5.4. Harmonisa

Harmonisa adalah gangguan distribusi listrik atau distorsi pada sebuah instalasi listrik. Fenomena ini timbul dari pengoperasian beban listrik yang tidak linier, dimana akan terbentuk gelombang yang berfrekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar 50 Hz atau 60 Hz, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni akan menjadi cacat.



Gambar 2.13 Gelombang Harmonisa

Kapasitor sangat sensitif terhadap arus harmonisa karena impedansinya mengurang secara proporsional terhadap urutan harmonisa yang ada (Nugroho, 2018). Hal ini disebabkan oleh impedansi kapasitor mengurang dengan peningkatan frekuensi, arus harmonisa yang besar mengalir ke dalam kapasitor. Arus ini dapat menyebabkan kelebihan beban kapasitor, yang secara bertahap mempersingkat umur operasinya. Dalam beberapa situasi ekstrem, bisa terjadi resonansi yang menghasilkan amplifikasi arus harmonisa dan distorsi tegangan yang sangat tinggi.

$$X_c = 1/2\pi f C \quad (2.10)$$

dimana :

X_c = reaktansi induktif (ohm)
 C = kapasitansi (farad)

Beban non-linear dalam sistem distribusi daya menghasilkan arus harmonisa yang menyebar ke seluruh sistem. Saat frekuensi atau urutan harmonisa meningkat, reaktansi induktif sistem daya meningkat, sementara reaktansi kapasitifnya menurun. Hal ini menghasilkan frekuensi harmonisa tertentu di mana reaktansi induktif dan kapasitif menjadi sama, membentuk titik persilangan yang dikenal sebagai titik resonansi paralel. Pada titik ini, sistem daya menunjukkan kesamaan kebetulan dari impedansi sistem. Masalah akibat resonansi paralel muncul ketika sumber harmonisa beroperasi pada frekuensi di mana impedansi cocok, menyebabkan resonansi harmonisa. Resonansi harmonisa menyebabkan arus dan tegangan harmonisa yang sangat tinggi pada frekuensi resonansi. Meskipun kecocokan impedansi yang tepat tidak mungkin terjadi, resonansi mendekati dapat tetap berbahaya. Sebagai contoh, jika titik resonansi paralel sejajar dengan harmonisa ke-5.3, dan sumber arus harmonisa ke-5 ada dalam sistem, masalah

mungkin terjadi. Secara ringkas, resonansi harmonisa dapat terjadi di bawah kondisi-kondisi berikut:

1. Beban harmonisa (misalnya, sistem penggerak AC/DC, pemanas induksi, perangkat busur, pasokan daya mode beralih, dan penyearah) beroperasi dalam sistem.
2. Sebuah kapasitor atau sekelompok kapasitor dan impedansi sumber berbagi reaktansi (impedansi) yang sama pada frekuensi yang setara dengan salah satu frekuensi karakteristik yang dihasilkan oleh beban harmonisa. Dengan kata lain, sistem berada pada resonansi paralel pada frekuensi yang sesuai dengan salah satu harmonisa yang ada pada sistem daya.

Resonansi harmonisa biasanya muncul sebagai fenomena *steady state* yang dipicu oleh peristiwa seperti perubahan pada sumber harmonisa, impedansi sumber, atau ukuran kapasitor (misalnya, menyalakan atau mematikan kapasitor secara bertahap). Saat menginstal kapasitor koreksi faktor daya, frekuensi resonansi paralel dapat diperkirakan menggunakan persamaan:

$$h = \sqrt{\frac{X_{trafo}}{X_C}} \quad (2.11)$$

dimana :

- h = orde frekuensi harmonisa
- X_{trafo} = Daya reaktif trafo (VAR)
- X_C = Daya reaktif (VAR)

Amplifikasi arus juga dapat meningkatkan daya *loss* yang bertambah.

$$P = I^2 * R \quad (2.12)$$

dimana :

- P = Daya nyata (W)
- I = Arus (A)
- R = Hambatan (Ohm)

2.6. Regulasi dan Standarisasi

IEC 60831-1: Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1000 V – Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation

IEC 60831-1 adalah standar internasional yang mengatur persyaratan teknis dan keamanan untuk kapasitor *self-healing* yang digunakan dalam sistem kelistrikan AC. Standar ini mencakup berbagai aspek, mulai dari klasifikasi suhu, toleransi kapasitansi, hingga batas arus dan tegangan operasi.

2.6.1. Klasifikasi Suhu Kapasitor

Kapasitor diklasifikasikan dalam kategori suhu berdasarkan angka dan huruf:

- Angka menunjukkan suhu terendah udara sekitar di mana kapasitor dapat beroperasi, dengan nilai preferensi: +5 °C, -5 °C, -25 °C, -40 °C, dan -50 °C.
- Huruf menunjukkan variasi suhu maksimum, dengan batas atas spesifik sebagaimana tercantum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kategori Suhu

Simbol	Ambient Temperature (°C)		
	Maksimum	Rata-rata Tertinggi Dalam Kurun Waktu	
		24 jam	1 tahun
A	40	30	20
B	45	35	25

Simbol	Ambient Temperature (°C)		
	Maksimum	Rata-rata Tertinggi Dalam Kurun Waktu	
		24 jam	1 tahun
C	50	40	30
D	55	45	35

Kategori suhu mencakup rentang dari $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Untuk penggunaan dalam ruangan, batas bawah suhu biasanya $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Penting untuk dicatat bahwa nilai-nilai ini mengasumsikan kondisi di mana kapasitor tidak memengaruhi suhu udara sekitar, misalnya dalam instalasi luar ruangan.

2.6.2. Toleransi Kapasitansi

IEC 60831-1 mengatur toleransi kapasitansi untuk memastikan kapasitor bekerja sesuai spesifikasi:

- Untuk unit dan bank hingga 100 kVAR, toleransi adalah -5% hingga $+10\%$.
- Untuk unit dan bank di atas 100 kVAR, toleransi adalah -5% hingga $+5\%$.
- Pada unit tiga fasa, rasio kapasitansi maksimum terhadap minimum yang diukur antara terminal saluran mana pun tidak boleh melebihi 1,08.

Ketentuan ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan antar fasa dan memastikan kinerja optimal dalam sistem tiga fasa. Dalam kebanyakan kasus, kriteria akhir masa pakai untuk kapasitor *Metallized Polypropylene Capacitor* (MPPC) ditentukan oleh kehilangan kapasitansi sebesar 5% dari nilai awal. Setelah kapasitansi atau *Equivalent Series Resistance* (ESR) mencapai batas ini, laju degradasi kapasitor cenderung meningkat, sehingga kapasitor dianggap telah mencapai akhir masa pakainya (Yao dkk., 2021).

2.6.3. Kapasitor dan Arus Operasi

Kapasitor harus mampu beroperasi terus-menerus pada arus garis 1,3 kali dari arus nominalnya, yang dihitung pada tegangan sinusoidal dan frekuensi nominal. Dengan mempertimbangkan toleransi kapasitansi hingga 1,1 C_N , arus maksimum dapat mencapai 1,43 I_N .

2.6.4. Batas Tegangan Operasi

Kapasitor memiliki batas durasi maksimum untuk berbagai tingkat tegangan:

- 1,0 U_N : Dapat beroperasi terus-menerus.
- 1,10 U_N : Maksimum 8 jam dalam setiap 24 jam.
- 1,15 U_N : Maksimum 30 menit dalam setiap 24 jam.
- 1,20 U_N : Maksimum 5 menit.
- 1,30 U_N : Maksimum 1 menit.

2.6.5. Harmonisa dan Arus Berlebih

Jika arus kapasitor melebihi batas maksimum yang ditetapkan saat tegangan masih dalam batas toleransi 1,10 U_N , harmonisa dominan harus diidentifikasi. Analisis ini bertujuan untuk menentukan penyebab arus berlebih dan solusi terbaik untuk masalah tersebut.

2.6.6. Relevansi Standar dalam Penelitian

IEC 60831-1 menjadi acuan penting untuk menilai kesesuaian kapasitansi, arus, tegangan, dan parameter lainnya dari kapasitor yang diteliti. Kepatuhan terhadap standar ini membantu menentukan apakah kerusakan disebabkan oleh ketidaksesuaian dengan kondisi operasi atau faktor eksternal seperti harmonisa.

2.7. Analisis Kegagalan

Analisis kegagalan adalah proses sistematis untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi penyebab terjadinya kegagalan atau kerusakan pada suatu komponen. Proses ini mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi kondisi serta situasi kegagalan tersebut. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk memahami penyebab kerusakan secara menyeluruh, sehingga dapat mencegah kejadian serupa di masa mendatang. Berikut adalah beberapa tujuan analisis kegagalan:

1. Mengidentifikasi penyebab utama terjadinya kegagalan pada komponen.
2. Mencegah terulangnya kerusakan yang sama dengan menerapkan langkah-langkah pencegahan yang relevan.
3. Menyusun laporan kegagalan yang dapat disampaikan kepada produsen atau pembuat komponen terkait.
4. Memberikan dasar untuk memodifikasi atau meningkatkan kualitas komponen tersebut.
5. Menyediakan data sebagai bahan pertimbangan dalam menyusun jadwal pemeliharaan yang efektif.

Proses investigasi kegagalan biasanya menggunakan metode *Root Cause Failure Analysis* (RCFA), yang membantu dalam mengidentifikasi akar masalah dan menentukan tindakan penanggulangan yang tepat. Langkah-langkah utama dalam melakukan analisis kegagalan meliputi:

1. Mengumpulkan dan mengorganisasi data, yaitu menghimpun semua informasi yang relevan terkait kegagalan.
2. Meninjau kinerja saat ini, yaitu melakukan evaluasi terhadap performa komponen secara keseluruhan.
3. Menggambarkan tren kinerja, yaitu mengidentifikasi pola atau kecenderungan yang muncul dari data yang tersedia.
4. Memprioritaskan masalah kinerja – Menentukan area atau masalah yang paling memerlukan perhatian.
5. Mengidentifikasi akar penyebab – Menganalisis faktor utama yang menyebabkan kegagalan.
6. Merumuskan kesimpulan dan langkah tindakan, yaitu menyusun rekomendasi berdasarkan analisis yang telah dilakukan.
7. Mengimplementasikan solusi, yaitu menerapkan langkah perbaikan yang telah direncanakan.

Melalui pendekatan ini, analisis kegagalan dapat menjadi alat yang efektif untuk meningkatkan keandalan komponen, meminimalkan risiko kerusakan, dan mendukung pengembangan produk yang lebih baik.

2.8. Kegagalan Kapasitor Daya

2.8.1. Kegagalan Dielektrik (*Dielectric Breakdown*)

Dielectric Breakdown atau kerusakan dielektrik adalah kondisi di mana material dielektrik (bahan isolasi) yang terdapat di dalam kapasitor mengalami kerusakan akibat tegangan yang melebihi batas ketahanannya. Material dielektrik pada kapasitor berfungsi untuk menyimpan energi listrik dan mengisolasi antara dua pelat konduktif. Ketika tegangan yang diterapkan pada kapasitor melebihi kekuatan dielektrik material tersebut, akan terjadi ionisasi dan pembentukan jalur konduktif yang menyebabkan arus listrik mengalir melalui dielektrik, yang biasanya tidak konduktif. Ini mengakibatkan penurunan fungsi isolasi dan bisa merusak kapasitor.

2.8.1.1. Penyebab Kegagalan

- *Overvoltage* (Tegangan Berlebih): Salah satu penyebab utama kerusakan dielektrik adalah tegangan yang melebihi rating tegangan maksimum dari kapasitor. Kondisi ini bisa terjadi akibat fluktuasi tegangan dalam sistem listrik atau kesalahan dalam desain atau instalasi.
- Degradasi Material Dielektrik: Seiring waktu, material dielektrik bisa mengalami penurunan kualitas akibat panas, tegangan, atau faktor lingkungan seperti kelembapan dan kontaminasi. Degradasi ini mengurangi kekuatan dielektrik material, membuatnya lebih rentan terhadap kerusakan.
- Harmonisa (Distorsi Harmonisa): Kehadiran harmonisa dalam sistem listrik dapat meningkatkan tegangan puncak pada kapasitor, yang dapat memicu kerusakan dielektrik.

- Cacat Produksi: Material dielektrik yang cacat atau tidak homogen akibat kesalahan produksi dapat memiliki titik lemah yang mudah rusak saat terkena tegangan operasional.

2.8.1.2. Dampak Kegagalan

- Peningkatan Arus Bocor: Ketika dielektrik rusak, arus listrik dapat bocor melalui jalur yang seharusnya terisolasi, meningkatkan arus bocor yang dapat menyebabkan panas berlebih dan kerusakan lebih lanjut.
- Penurunan Kapasitansi: Kerusakan dielektrik sering mengakibatkan penurunan kapasitansi kapasitor, mengurangi kemampuannya untuk menyimpan dan mengatur energi listrik sesuai kebutuhan sistem.
- Kegagalan Kapasitor: Dielectric breakdown yang parah dapat menyebabkan kerusakan permanen pada kapasitor, mengakibatkan kegagalan total dan membutuhkan penggantian kapasitor.
- Gangguan pada Sistem Listrik: Kegagalan kapasitor dalam sistem tenaga listrik dapat menyebabkan fluktuasi tegangan, gangguan pada operasi peralatan, dan bahkan kerusakan pada komponen lain dalam sistem.

2.8.2. *Thermal Overload*

Thermal overload terjadi ketika kapasitor mengalami suhu yang berlebihan, baik dari suhu lingkungan yang tinggi maupun dari arus *ripple* yang tinggi. Suhu yang berlebihan ini dapat menyebabkan bahan dielektrik di dalam kapasitor menjadi rusak. Kapasitor dengan suhu kerja di atas batas yang direkomendasikan akan mengalami degradasi lebih cepat dan kemungkinan besar akan mengalami kegagalan.

2.8.2.1. Penyebab Kegagalan

- Arus *Ripple* yang Tinggi: Arus *ripple* yang tinggi dapat menyebabkan pemanasan berlebih di dalam kapasitor.
- Suhu Lingkungan yang Tinggi: Jika kapasitor ditempatkan di lingkungan dengan suhu yang tinggi, ini akan menambah beban termal pada kapasitor.
- Ventilasi yang Buruk: Kurangnya sirkulasi udara di sekitar kapasitor dapat menyebabkan penumpukan panas.
- Desain yang Tidak Memadai: Kapasitor yang tidak dirancang untuk menangani kondisi operasional tertentu mungkin tidak dapat mengelola beban termal dengan baik.

2.8.2.2. Dampak Kegagalan

- Kerusakan Bahan Dielektrik: Suhu tinggi dapat menyebabkan bahan dielektrik di dalam kapasitor rusak, yang pada akhirnya akan menyebabkan kehilangan kapasitansi dan peningkatan kehilangan daya.
- Pemendekan Umur Kapasitor: Kapasitor yang terus-menerus terkena beban termal berlebih akan memiliki umur yang lebih pendek dibandingkan dengan yang beroperasi pada suhu normal.
- Risiko Kebakaran: Dalam kasus yang parah, panas yang berlebihan dapat menyebabkan kebakaran, terutama jika ada bahan yang mudah terbakar di sekitar kapasitor.
- Kegagalan Sistem: Kegagalan kapasitor dapat menyebabkan gangguan pada sistem kelistrikan yang lebih luas, termasuk pemadaman dan kerusakan pada peralatan lain

2.9. Perbandingan dengan Penelitian Lain

Tabel 2.2 Perbandingan dengan Penelitian Lain

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Proses Pengujian Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Penulis	Publikasi Jurnal
1	Deni Almanda, Nurkholis Majid	Studi Analisa Penyebab Kerusakan Kapasitor Bank di PT. Astra Daihatsu Motor	Studi kasus dengan analisis pengukuran harmonisa, analisis kapasitas daya, dan simulasi perbaikan sistem.	Kegagalan dipicu oleh harmonisa tinggi dari efek beban non-linier pada sistem.	Standar harmonisa yang digunakan adalah standar IEEE 519 1992. Sedangkan penulis menggunakan standar spesifikasi kapasitor.	
2	Thomas M. Blooming	Capacitor Failure Analysis: A Troubleshooting Case Study	Studi kasus dengan analisis pengukuran harmonisa dan transien di sistem distribusi daya suatu pabrik pengolahan baja.	Kegagalan disebabkan oleh resonansi harmonisa dan transien kapasitor.	Perbedaan lokasi dan jenis kapasitor yang diteliti bukan tipe self healing. Sedangkan penulis meneliti kapasitor self healing.	
3	C. Boonseng, C. Chompooinwai, V. Kinnares, K. Nakawiwat, P. Apiratikul	Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects	Studi kasus dengan analisis pengukuran harmonik dan analisis kegagalan dielektrik.	Resonansi harmonik menyebabkan peningkatan suhu dan stres pada dielektrik, yang mempercepat kegagalan kapasitor.	Perbedaan lokasi dan jenis kapasitor yang diteliti bukan tipe self healing. Sedangkan penulis meneliti kapasitor self healing.	