

JURNAL ELEKTRO

Analisa Resistansi Elektroda Pentanahan Pada Menara Transmisi 150 KV PLTGU Cilegon – Cilegon Baru, Oleh : Triongko Priyono, Sulaeman

Optimalisasi Program PLC Untuk Cek A/F Sensor Pada Mesin Test Bench, Oleh : Lukman Aditya, Dumes Hasudungan

Safety Smart Home Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno ATmega 328 P dan Smoke Detector MQ-2 , Oleh : Sri Hartanto, Muhamad Irhamni

Studi Penerapan Layanan Voice Over Internet Protocol (VOIP) Berbasis Raspberry P1, Oleh : Teten Dian Hakim, Muryadi

Perencanaan Jaringan FTTH Dengan Teknologi GPON Di Perumahan Bumi Dirgantara Permai, oleh : Slamet Purwo S, Tri Andriyanto

Analisa Pengujian Transformator 2 MVA 33,42/0,575 V, Oleh : Ujang Wiharja, Yayan Supriadi

Analisis Aliran Daya Pada Gedung Bertingkat Dengan Sumber Tegangan 20 kV Menggunakan ETAP 12.6, Oleh : Abdul Kodir Al Bahar, Gusti Febriyanto

Optimalisasi Energi Listrik Diantara Penggunaan Kapasitor Daya Dengan Motor Sinkron , Oleh: Nurhabibah Naibaho

OPTIMALISASI ENERGI LISTRIK DIANTARA PENGGUNAAN KAPASITOR DAYA DENGAN MOTOR SINKRON

Nurhabibah Naibaho

bibahoo@gmail.com

ABSTRAK- Perusahaan Listrik Negara PLN mengeluarkan peraturan bahwa pada konsumen yang mempunyai faktor daya lebih rendah dari 0,85 dikenakan denda, yaitu denda kelebihan pemakaian daya reaktif kVArh. Untuk mengetahui pemakaian daya reaktif dari langganan, PLN melakukan pemasangan meteran disebut kVArh-meter dan kWh-meter. Bagaimana rugi-rugi jika dalam sistem terdapat faktor daya yang rendah. Dua cara untuk memperbaiki faktor daya, dengan menggunakan kapasitor daya sebagai sumber daya reaktif statis dan dengan menggunakan motor sinkron sebagai sumber daya reaktif dinamis. Besarnya sumber daya reaktif yang dipasang, harus diketahui berapa faktor daya pada sistem, sehingga mengetahui berapa sumber daya reaktif yang dipasangkan. Dalam pemilihan kapasitor daya untuk suplai tegangan 3 phasa, umumnya yang tersedia dipasaran berbentuk kapasitor bank, dimana kebutuhan total kapasitor daya 436 kVAr, maka dapat dibagi menjadi 40 kVAr dikali 11 step yaitu 440 kVAr. Secara ekonomis penggunaan motor sinkron sebagai kompensator dapat dilihat, perbandingan antara bank Kapasitor dengan Motor sinkron 1:2,5. Jika menaikkan faktor daya dengan menggunakan motor sinkron biaya sampai 250% lebih mahal daripada jika kapasitor daya dengan hasil perbaikan faktor daya nilai sama 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif. Pemasangan kapasitor daya atau motor sinkron sebagai sumber daya reaktif yang berfungsi untuk memperbaiki faktor daya, dapat dilakukan dengan sistem yang diinginkan dengan perhitungan beban dan posisi pemasangan.

ABSTRACT- The State Electricity Company PLN issues a regulation concerning consumers who have a power factor lower than 0.85 subject to fees, namely the additional cost of using reactive power kVArh. To find out the reactive power usage of the subscription, PLN installs the meter called kVArh-meter and kWh-meter. How to lose if in the system Low power factors. Two ways to improve power factor, by using power capacitors as statistical reactive resources and by using synchronous motors as dynamic reactive resources. Large reactive resources installed, the number of power factors in the system must be known, so that paired reactive resources are known. In the selection of power capacitors for supply of 3-phase voltages, the general market-available capacitors are called banks, while the total capacitor needs 436 kVAr, it can be divided into 40 kVAr times 11 steps 440 kVAr. Synchronously financially using a motor as a compensator can be seen, selected between the bank capacitors with synchronous motors 1: 2.5. If increasing the power factor using a synchronous motor costs up to 250% more expensive than the power capacitor with the result of the improvement of the power factor the same value of 0.75 inductive becomes 0.95 inductive. Installation of power capacitors or synchronous motors as reactive power sources needed to improve power factor, can be done with the desired system by calculating the load and mounting position

Kata kunci: Kapasitansi Kapasitor, Motor Sinkron, Kapasitor Bank, Faktor Daya.

BAB I. PENDAHULUAN

Dua macam cara untuk mencapai factor daya yang baik, yaitu menggunakan kapasitor daya disebut dengan Bank Kapasitor dan menggunakan motor sinkron. Selain faktor tersebut umumnya perusahaan pembangkit tenaga listrik Perusahaan Listrik Negara PLN, memberikan penalty atau denda pada konsumen yang konsumsi daya reaktif melewati batas yang telah ditentukan. Pada pemakaian kedua sistem merupakan cara ekonomis, cepat dan aman untuk menyalurkan daya reaktif yang diperlukan meskipun harus mempertimbangkan mana yang lebih baik dari kedua cara jika dipilih pada salah satu cara saja. Pokok permasalahan yang dibahas adalah bagaimana rugi-rugi yang terjadi jika suatu sistem jaringan tegangan rendah mempunyai faktor daya yang rendah juga keuntungan dan kerugian. Tujuannya untuk melihat manfaat yang lebih menguntungkan jika dalam usaha memperbaiki faktor daya dalam sistem listrik digunakan kapasitor daya atau motor sinkron. Peningkatan faktor daya pada jaringan listrik akan menyebabkan penghematan energi yang diperlukan baik dari perencanaan maupun dalam pemakaian.

II. KAPASITOR SEBAGAI SUMBER DAYA REAKTIF STATIS

A. Umum

Untuk meningkatkan atau mengoreksi factor daya yang ditimbulkan oleh beban-beban seperti AC, motor, lampu TL, dan lain-lain. Cara pemasangan kapasitor pada jaringan distribusi, yaitu secara seri dan paralel. Keuntungan kapasitor paralel adalah Harga per-kVAr yang relatif murah, Ringan dan praktis, Rugi-rugi daya aktif yang relatif kecil. Sebagai perbandingan rugi-rugi pada kapasitor sekitar 10 sampai 20 kali lebih kecil dibandingkan dengan kondensator sinkron. Rugi-rugi daya aktif kapasitor per-kVAr berkisar 0,5–5 Watt. Pada kapasitor tidak ada bagian yang berputar ini akan menghemat biaya bangunan, Operasi dan perawatan yang mudah. Kerugian pemakaian kapasitor paralel adalah Kapasitor mempunyai standar rating tertentu dan mengalami kerusakan, tidak bisa diperbaiki lagi.

B. Prinsip Kapasitor

Dua konduktor yang mempunyai jumlah muatan yang sama tapi berlawanan polaritas. Dan berkemampuan untuk menyimpan energi listrik electrostatic berupa medan listrik yang dapat dilepaskan menurut keadaan tertentu. Dan menyebabkan arus yang melaluinya terdahulu leading terhadap tegangan, disebut arus kapasitif, untuk mengkompensir arus induktif tertinggal lagging yang banyak dibutuhkan oleh peralatan dalam sistem tenaga listrik. Jika antara lempengan tersebut hampa udara, sebagai bahan dielektriknya,

maka besar kapasitansi dari kapasitor tersebut adalah: $C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \text{ Farad} \dots 2.1$

dimana: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$

d = Jarak antara plat m

A = Luas antara plat hampa udara.

Fungsi dielektrik padat yang digunakan antara plat-plat dari suatu kapasitor antara lain adalah memecahkan masalah mekanis, untuk membuat dua lembar plat logam besar dan kapasitansi dari kapasitor beberapa kali lebih besar, jika menggunakan suatu dielektrik antara plat-platnya dari pada bila plat berada dalam ruang hampa udara. Kapasitansi dari suatu kapasitor yang menggunakan bahan dielektrik antara plat-platnya $C = kC_0$, maka $C = k\epsilon_0 \frac{A}{d} \text{ Farad} \dots 2.2$

dimana:

C = Kapasitansi kapasitor antar plat dielektrik Farad.

K = Koefisien dielektrik

ϵ = Permeabilitas dan dielektrik.

Bila dalam sistem tenaga listrik fungsi kapasitor adalah sebagai sumber daya reaktif, bila dayanya dinyatakan dalam besaran reaktif (VAr atau kVAr):

$$Q = E \times I \rightarrow I = \frac{EA}{X_c}$$

$$Q = E^2 \times 2\pi \times f \times C \text{ vAr}$$

$$Q = E^2 \times 2\pi \times f \times C 10^3 \text{ kVAr} \dots 2.3$$

$$Q = 3E^2 \times 2\pi \times f \times C 10^3 \text{ kVAr} \dots 2.4$$

Dimana: Q = Daya reaktif kapasitor (kVAr)

E = Tegangan nominal (Volt)

C = Kapasitansi dari kapasitor (Farad)

F = Frekwensi jala-jala (Hz)

Kapasitor untuk mensuplai daya reaktif pada jaringan tegangan rendah:

- Daya reaktif yang disuplay dari kapasitor.
- Tegangan nominal yang dipakai pada sinkron.
- Frekwensi jala-jala system
- Bentuk atau tipe dari unit kapasitor

C. Macam-macam Bahan Dielektrik

Sistem dielektriknya dapat dibuat dari Seluruh dielektriknya dari kertas tissue, Lapisan campuran kertas-plastik. Lapisan plastik dengan cairan yang didapatkan. Untuk semua kapasitor yang dielektrik kertas, umumnya digunakan askarel sebagai pematat. Tissue dengan kepadatan tinggi yang tebal normalnya 10-16 μm sering dipakai. Pada kapasitor plastik, ada 3 macam konstruksi yang umumnya: Dielektrik askarel mempunyai keuntungan Pematatan mudah dilakukan karena permukaan kertas kasar memudahkan masuknya bahan pematat diantaranya polypropylene. Kerugian dielektrik dari kapasitor lebih kecil dibandingkan bila seluruh dielektriknya dibuat dari kertas, menggunakan gabungan 2 macam dielektrik lebih besar dari pada dielektrik kertas saja. Dielektrik polypropylene askarel yang dipadatkan. Dan dielektrik polypropylene yang dipadatkan dengan minyak mineral dan elektro kertas berlapis logam.

D. Menghitung Kebutuhan Daya Reaktif.

Kapasitor paralel dengan saluran dan secara intensif digunakan pada jaringan tegangan rendah.

1. Metoda Analisa Data Instalasi,

Contoh: Beban aktif total 700 kW.

Dari data beban $\cos \phi$ rata-rata 0,8.

Dari rumus diketahui beban reaktif,

$$Q = kW \times \tan(\cos \phi) \text{ kVAr} \dots 2.5$$

Maka pemakaian daya reaktif:

$$Q = 700 \times \tan(\cos^{-1} 0,8)$$

$$Q = 700 \times 0,7 = 525 \text{ kVAr}$$

jadi: $\tan \phi_1 = \frac{525}{700} = 0,75 \rightarrow \phi_1 = 36,9^\circ$

$$\cos \phi_1 = \cos 36,9^\circ = 0,8$$

Jika $\cos \phi_1$ 0,8 menjadi $\cos \phi_2$ 0,95 cari kVAr setelah pemasangan kapasitor.

$$Q_2 = kW \times \tan \phi_2$$

$$Q_2 = kW \times \tan(\tan^{-1} 0,95) \text{ kVAr}$$

$$Q_2 = 700 \times 0,33 = 231 \text{ kVAr}$$

Penambahan daya reaktif yang disuplai dari bank kapasitor, $Q_c = P(\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \text{ kVAr} \dots 2.6$

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = 525 - 231 = 294 \text{ kVAr}$$

Kelebihan metoda diperoleh nilai maksimum, tidak perlu alat ukur, waktu dan biaya untuk mengukur masing-masing jenis beban. Dan kekurangannya adalah instalator dan pemakai harus partisipasi dalam memberikan data yang diperlukan dan benar.

2. Metoda Pengukuran pada Instalasi

Dilakukan pada Masing-masing sub-distribusi, panel sub-distribusi, panel induk distribusi. Pengukuran berdasarkan letak bank kapasitor, biasanya Arus jaringan (A), Tegangan jaringan (V), Faktor daya ($\cos \phi$). Contoh:

Pabrik mempunyai data instalasi:

Arus jaringan (I) = 1010 A.

Tegangan jaringan (V) = 400 V.

Faktor daya ($\cos \phi$) = 0,75

Berapa daya kapasitor agar faktor daya 0,95.

Solusi: Daya kapasitor:

$$Q_c = k \times P \rightarrow k = \text{Koefisien dari Tabel 0,55}$$

$$P = V \times I \times \cos \phi \sqrt{3}$$

$$P = 400 \times 1010 \times 0,75 \times \sqrt{3} = 525 \text{ kW}$$

$$Q_c = 0,55 \times 525 = 290 \text{ kVAr}$$

Daya kapasitor yang harus dipasang sebesar 290 kVAr. Kelebihan metoda tidak diperlukan data dari setiap jenis beban, diperoleh data yang akurat. Kekurangan metoda ini data merupakan nilai pada saat pengukuran, memerlukan alat pengukuran.

3. Metoda Kwitansi PLN

Metoda paling praktis karena pada metoda tidak perlu data instalasi ataupun proses pengukuran pada instalasi. Hanya memerlukan kwitansi PLN dari pabrik atau instalator sebelum pemasangan bank kapasitor. Langkah-langkah yang harus ditempuh:

- a. Menghitung pemakaian

$$kWh_{Total} (\text{LWBP} + \text{WBP}) \text{ selama sebulan}$$

- b. Menghitung pemakaian $kVAr_{Total}$ selama sebulan.

- c. Mencari faktor daya $\cos \phi_{rata-rata}$

$$\cos \phi_{rata-rata} = \frac{kWh_{Total}}{\sqrt{kWh_1^2 + kVAr_1^2}}$$

Mencari pemakaian $kW_{maks} = kVA_{Terpasang} \times \cos \phi$

- d. Menghitung kebutuhan $kVAr$ agar tercapai $\cos \phi$ yang diinginkan sama dengan koefisien $x kW_{maks}$.

E. Sistem Pengaman Kapasitor Paralel

Terdiri dari dua bagian Sistem pengaman external, Sistem pengaman internal. Instalasi kapasitor pada jaringan tegangan rendah biasanya yang dipakai sebagai pengaman external hanya berupa sekering HRC fuse atau pemutus daya Circuit Breaker. Sedangkan peralatan untuk pengaman internal dipakai Pelebur listrik electrical fuse, Pelebur panas thermal fuse.

III. MOTOR SINKRON SEBAGAI SUMBER DAYA REAKTIF DINAMIS

A. Umum

Kondensator sinkron istilah bagi motor sinkron tanpa beban yang diberi penguatan berlebih pada kumparan medannya. Bahwa motor sinkron mempunyai kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Bila kumparan jangkar dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa akan menimbulkan medan putar pada stator. Kutub medan rotor yang diberikan penguat arus searah DC mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama sinkron. Bila arus medan pada rotor cukup untuk membangkitkan fluks ggm yang diperlukan motor, maka stator tidak perlu memberikan arus magnet atau daya reaktif dan motor bekerja pada faktor daya 1,0. Kalau arus medan pada rotor berkurang penguat berkurang, stator akan menarik arus magnet dari jala-jala, sehingga motor bekerja pada faktor kerja terlambat lagging. Sebaliknya bila arus medan rotor berlebih penguat berlebih, kelebihan fluks ggm ini harus diimbangi, dan stator akan menarik arus yang bersifat kapasitif dari jala-jala, dan karenanya motor bekerja pada faktor kerja mendahului leading. Jelas bahwa faktor kerja motor sinkron dapat diatur dengan mengubah arus medan (I_f). V berhimpit dengan E karena dalam keadaan tanpa beban dengan sudut daya $\phi=0$. Daya aktif $P = V \times I \cos \phi = 0$. Jadi motor berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif yang bersifat kapasitif kapasitor. Arus magnetisasi lagging current ditarik dari jala-jala. Jadi motor berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif yang bersifat induktif.

B. Pengoperasian Motor Sinkron

Secara konstruksi motor sinkron tidak berbeda dari konstruksi generator yang daya dan kecepatannya sama. Umumnya rotornya jenis kutub menonjol mempunyai daya guna paling tinggi. Prinsip kerjanya dapat mengasut sendiri sebagai motor induksi dengan menggunakan sangkar hubung pendek yang dipasang pada permukaan kutub. Motor sinkron untuk menggerakkan mesin industri yang kecepatannya konstan seperti kompresor, peniup, pompa, dan kipas angin dan untuk

memperbaiki faktor daya secara ekonomis. Konstruksi motor sinkron mempunyai gulungan armatur yang terhubung dengan suplay arus bolak-balik AC dari jala-jala, dan mempunyai gulungan medan yang terhubung dengan suplay arus searah DC dari jala-jala. Motor juga mempunyai gulungan ketiga yang terhubung singkat. Gulungan jangkar lebih kompleks dan disuplai dengan tegangan bolak-balik AC untuk motor ukuran besar mencapai 13.000 Volt. Kutub khayal berputar dengan kecepatan yang tertentu:

$$N = \frac{120f}{p} \text{ putaran permenit}$$

Dimana: N = Kecepatan motor
f = frekwensi
p = jumlah kutub

Banyaknya putaran tiap menit disebut putaran serempak sinkron. Bila rotor dan kutub diputar dengan arah putaran yang sama seperti arah putaran kutub khayal yang juga diputar dengan kecepatan sinkron, maka mudah dimengerti bahwa motor akan berputar terus bersama-sama dengan putaran kutub magnet yang tidak senama, sehingga ada kekuatan saling tarik-menarik seperti dijelaskan pada Gambar dimana kutub khayal utara U berhadapan dengan kutub magnet selatan S. Kutub khayal selatan S berhadapan dengan kutub magnet utara U selama pada besi stator ada kutub khayal berputar yang selama itu lilitan stator dialiri arus putar, maka akan berputar terus. Bahwa motor sinkron tidak dibebani. Demikian pada dasarnya bekerjanya motor sinkron, tetapi perlu diingat bahwa apa yang telah diuraikan hanya teori.

C. Menjalankan Motor Sinkron

Agar rotor dari motor sinkron dapat berputar bersama-sama dengan lapang putar, perlu diputar sampai dapat kecepatan sinkron, yaitu sesuai persamaan rumus diatas. Kecepatan sinkron dapat tercapai, maka lilitan stator tiga fasa dihubungkan dengan jaringan arus putar, seperti mensinkronkan generator arus putar dengan jaringan arus putar.

Empat cara untuk menjalankan motor sinkron:

- Diputar dahulu oleh motor pembantu, sehingga motor mencapai putaran sinkron. Bagaimana dapat mengetahui bahwa motor telah mencapai putaran sinkron?. Untuk mengetahui lihat pada alat ukur frekwensi meter yang dibaca sebesar 50 Hz. Bahwa putaran motor sudah mencapai putaran sinkron sebagaimana ketentuan putaran sinkron. Sebenarnya motor diputar sebagai sebuah genertor, oleh karena itu dapat memberikan frekwensi. Tetapi dengan tercapainya putaran sinkron, belum dapat diartikan tiap kutub magnet utara rotor berhadapan dengan kutub khayal S bila stator dihubungkan ke jala-jala.
- Diputar lebih dahulu oleh motor DC yang satu poros dengan motor sinkron. Jika motor sinkron dipakai pada instalasi perubah arus, dari arus

bolak-balik tiga fasa menjadi arus searah, maka dinamo arus searah dijalankan sebagai motor. Motor sinkron dan dinamo arus searah harus satu poros bersamaan. Tentu banyaknya putaran dinamo arus searah saat bekerja sebagai motor DC sesuai dengan banyaknya putaran sinkron.

- Secara bersama-sama dengan mulai berputarnya generator arus putar, menerima arus langsung dari generator. Cara ini motor sinkron tidak diputar terlebih dahulu, tetapi motor menerima arus putar tidak langsung dari jaringan arus putar melainkan dari generator arus putar. Generator dan motor bersama-sama berputar, bertambah cepat putarannya mencapai putaran sinkron.
- Dengan menempatkan lilitan pembantu pada kutub magnet. Dengan menempatkan batang kawat tembaga yang berbentuk lingkaran seperti cincin besar dalam saluran yang membujur sepanjang kutub magnet. Batang tembaga serta dua cincin tembaga merupakan suatu sangkar isebut lilitan pembantu. Bila lilitan stator dari motor sinkron dihubungkan dengan jaringan arus putar, timbul lapang putar pada statornya. Lapang putar dapat menginduksi GGL dalam lilitan pembantu keadaan hubung singkat, maka dalam lilitan pembantu mengalir arus. Arus membangkitkan kopel sehingga sangkar berputar. Dengan demikian rotor mulai berputar sendiri tanpa bantuan.

D. Lengkung V Motor Sinkron

Motor sinkron bahwa pemakaian arus yang induktif dan kapasitif oleh motor dari jala-jala terdapat pemakaian arus yang bebas induktif, motornya memakai arus yang minimum. Baik bagi motornya dan juga menguntungkan bagi instalasi karena tidak banyak tenaga panas yang hilang di kawat penghantar dan di lilitan motornya. Grafik garis merupakan huruf V, grafik garis diberi nama Garis lengkung V. Harga dari pemakaian arus jala-jala I sebagai garis tegak, harga dari arus penguatan I_m secara mendatar. Garis lengkung yang ditarik penuh berlaku keadaan motor dibebani, dan garis lengkung yang ditarik titik-titik berlaku untuk motor yang tidak dibebani. Pada pemberian arus penguatan sebesar $I_m = OM$ didapat pemakaian arus jala-jala sebesar $I = MN$. Arus yang berjalan sefase dengan tegangan klem, berarti faktor daya $\cos\phi$ sama dengan 1,0. Daerah sebelah kiri garis MN berlaku untuk pemakaian arus jala-jala induktif dan sebelah kanan untuk memakai arus jala-jala kapasitif. Sifat motor sinkron mempunyai ciri-ciri untuk memperbaiki faktor daya dari jala-jala, oleh beberapa pabrik membuat motor sinkron yang khususnya digunakan untuk mengatur dan memperbaiki faktor daya dari jala-jala. Motor dikenal dengan Fasa Kompensator.

E. Motor Sinkron Sebagai Kapasitor

Motor sinkron bekerja pada faktor daya 1,0 atau 0,8 kapasitif. Keadaan terakhir diperoleh dengan memberikan penguatan yang lebih besar. Motor yang bekerja pada faktor daya 0,8 kapasitif akan mempunyai struktur medari yang lebih besar dan karenanya akan lebih mahal. Maksud pengoperasian pada faktor daya yang kapasitif adalah untuk memperbaiki faktor daya dari sistem, jika terdapat beban yang lain yang bersifat induktif, seperti motor induksi dan transformator. Dengan demikian daya guna pengaturan tegangan dan kapasitas dapat ditingkatkan. Motor sinkron yang diberi penguatan lebih akan bekerja sebagai kapasitor serta menyerap arus yang mendahului atau dipandang sebagai generator yang memberi arus terlambat. Motor sinkron yang bekerja tanpa beban dan khusus pada kapasitor disebut kompensator sinkron. Kompensator sinkron diasut dengan cara sama seperti motor sinkron. Keuntungan penggunaan kompensator sinkron adalah kapasitasnya dapat diatur pada daerah tegangan mendahului arus lagging dan daerah arus yang mendahului tegangan leading.

IV. PERBANDINGAN PENGGUNAAN KAPASITOR DENGAN MOTOR SINKRON DARI SUDUT TEKNIS

A. Perhitungan Kebutuhan Beban

Industri umumnya menggunakan beban induktif dan resistif. Bila faktor daya dari beban terlalu rendah, perusahaan harus menyediakan daya listrik besar agar mencukupi dan tidak mengganggu kegiatan perusahaan. Dengan jumlah daya listrik yang besar, jumlah arus listrik yang dihasilkan lebih banyak dan penggunaan kabel distribusinya harus lebih besar agar tidak panas dan jatuh tegangan berkurang. Tetapi dengan biaya yang dikeluarkan perusahaan cukup besar sehingga pemborosan biaya dan energi listrik. Untuk keadaan ini harus dipikirkan cara agar dapat dihindari. Untuk itu harus memperbaiki faktor daya, agar jumlah daya nyata yang diserap oleh beban berkurang. Untuk mengurangi beban pada instalasi listrik harus dipasang suatu alat yang mensuplay arus reaktif, sehingga rugi daya akibat pembentukan medan magnet dihilangkan. Bagaimana sumber daya reaktif bekerja pada suatu beban induktif dan jika beban tanpa dipasang sumber daya reaktif, maka daya aktif dan daya reaktif akan disuplay dari sumber, akan menyebabkan daya nyata atau kapasitas sumber akan lebih besar pemakaiannya. Jika beban dipasang sumber daya reaktif kapasitor daya atau motor sinkron, maka pada sumber hanya mensuplay daya aktif sedangkan daya reaktif disuplay dari sumber daya reaktif sendiri. Hal ini menyebabkan daya nyata atau kapasitas dari sumber bisa dimanfaatkan sesuai dengan kapasitas

maksimal pemakaian. Untuk menghitung perbandingan pemakaian sumber daya reaktif diam yaitu antara kapasitor daya dengan motor sinkron, didasarkan pada perhitungan kebutuhan beban, sehingga dapat dibandingkan keuntungan dan kerugian dari pemakaian kedua system. Dari perencanaan pabrik dalam bidang industri, data kebutuhan listrik di pabrik:

1. Data sumber
 - Daya terpasang/daya nyata S = 1000 kVA
 - Tegangan system V = 380 V, 3 phasa
 - Frekwensi F = 50 Hz
2. Data beban
 - Beban statis: lampu TL, AC, dll P = 300kW
 - Beban bergerak: motor 2x200 kW P = 400 kW
 - Beban bergerak: motor 1x90 kW P = 90 kW
 - Total beban P_{Total} = 790 kW
3. Faktor daya beban:
 - Beban statis : cos φ_{rata-rata} = 0,7 ind
 - Beban motor 200 kW cos φ_{rata-rata} = 0,8 ind
 - Beban motor 90 kW cos φ_{rata-rata} = 0,7 ind

Hitung faktor daya yang terukur pada sumber apakah daya pada sumber cukup untuk menjalankan seluruh beban. Dengan diagram satu garis perhitungan beban kebutuhan beban dan faktor daya yang terukur pada sisi tegangan rendah:

1. Kebutuhan daya pada beban:
 - $P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots 4.1$
 - $P_{total} = 300 + 200 + 200 + 900 = 790 \text{ kW}$
2. Faktor daya yang terukur pada saat beban beroperasi
 - $\cos \varphi_{rata-rata} = \frac{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \cos \varphi_3 + \cos \varphi_4}{4} \dots 4.2$
 - $\cos \varphi_{rata-rata} = \frac{0,7 + 0,8 + 0,8 + 0,7}{4}$
 - $\cos \varphi_{rata-rata} = 0,75 \text{ induktif}$

Daya nyata saat beroperasi:

$$S_{beban} = \frac{P_{total}}{\cos \varphi_{rata-rata}} \dots 4.3$$

$$S_{beban} = \frac{790}{0,75} = 1053 \text{ kVA}$$

Daya terpasang 1000 kVA, pada kondisi normal, maksimum pembebanan pada trafo 90% dari total kemampuan maksimal trafo. Jadi daya nyata yang bisa dibebankan ke sumber trafo adalah 90% dari 1000 kVA sehingga daya nyata maksimum 900 kVA. Kondisi beban dioperasikan semua, terdapat kekurangan daya:

$$S = S_{sumber} - S_{beban} = 900 - 1053 = -153 \text{ kVA}$$

Berdasarkan analisa disimpulkan beban tidak bisa dijalankan sekaligus, karena faktor daya 0,75 induktif, maka pabrik dikenakan denda kVArh dari PLN. Untuk menghindari hal ini faktor daya harus dinaikkan dan untuk menaikkan faktor daya digunakan sumber daya reaktif yaitu kapasitor daya atau motor sinkron.

B. Evaluasi Teknis Penggunaan Kapasitor Daya

Bahwa salah satu sumber daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya adalah kapasitor daya. Untuk mengevaluasi penggunaan kapasitor daya, terlebih dahulu menjelaskan bekerjanya kapasitor daya, kemudian dihitung kebutuhan daya reaktif

yang digunakan dan pemilihan dan cara pemasangan kapasitor daya.

1. Analisa kapasitor daya

Cara kerja kapasitor daya bagaimana kompensator mensuplai daya reaktif pada beban sehingga dari sumber akan dapat dihilangkan. dimana:

- P = Daya Aktif (kW)
- S₁ = Daya nyata sebelum kompensasi (kVA)
- S₂ = Daya nyata setelah kompensasi (kVA)
- Q₁ = Sebelum kompensasi (kVAr)
- Q₂ = Setelah kompensasi (kVAr)
- Q_c = Disuplai oleh kapasitor (kVAr)
- φ₁ = Sudut sebelum kompensasi (°)
- φ₂ = Sudut setelah kompensasi (°)

Bahwa sebelum kapasitor dipasang daya reaktif yang disuplai dari sumber lebih besar dibandingkan setelah dipasang kapasitor. Juga terlihat sudut φ lebih besar sebelum dipasang kapasitor daya dibandingkan setelah dipasang kapasitor daya.

2. Kebutuhan daya reaktif

Untuk menghitung kebutuhan daya reaktif berdasarkan perhitungan kebutuhan beban mendahului. Data beban diketahui:

$$\text{Daya aktif total } P = 790 \text{ kW}$$

$$\text{Cos } \phi = 0,75 \text{ induktif}$$

Dalam pemakaian daya listrik, faktor daya yang baik adalah 0,95 induktif. Jadi faktor daya target (cos φ_{target}) adalah 0,95 induktif, berdasarkan teori:

$$\text{Daya reaktif : } Q_{awal} = kW \times \tan \phi$$

$$Q = 790 \times \tan(\cos^{-1} 0,75)$$

$$Q = 790 \times 0,88 = 696,7 \text{ kVAr}$$

Jika cos φ_{target} induktif, maka dapat dicari pemakaian kVAr pada kondisi ini:

$$\text{Daya reaktif: } Q_{target} = kW \times \tan \phi$$

$$Q_{target} = kW \times \tan \phi$$

$$Q = 790 \times \tan(\cos^{-1} 0,95)$$

$$Q = 790 \times 0,33 = 260,7 \text{ kVAr}$$

Jadi penambahan daya reaktif yang dari kapasitor daya:

$$Q_{akhir} = Q_{awal} - Q_{akhir} = 696,7 - 260,7$$

$$= 436 \text{ kVAr}$$

Jadi daya reaktif yang harus disuplai dengan kapasitor daya jika cos φ dinaikkan dari 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif adalah 436 kVAr.

3. Pemasangan kapasitor daya

Diperoleh besarnya daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif. Dengan kebutuhan daya reaktif 436 kVAr, maka sistem pabrik harus dipasang kapasitor daya 436 kVAr. Tetapi dalam pemilihan kapasitor daya untuk suplai tegangan 3 fasa, umumnya yang tersedia dipasaran berbentuk kapasitor bank, satu bank ukuran: 10 kVAr, 15 kVAr, 20 kVAr, 25 kVAr, 30 kVAr, 40 kVAr, 50 kVAr, 60 kVAr, 70kVAr, 80 kVAr, 90 kVAr, dan 100 kVAr. Kebutuhan total kapasitor daya 436 kVAr, maka dapat dibagi menjadi 40 kVAr dikali 11 step yaitu 440 kVAr. Pemilihan kapasitor merupakan ketentuan teknis secara umum:

- Kapasitor jenis kering polypropylene
- Bisa memperbaiki kerusakan sendiri
- Proteksi internal 100% HRC fuse dikoordinasi dengan alat deteksi tekanan.
- Instalasi internal hubungan delta, 3 fasa.

- Daya reaktif satu bank kapasitor 40kVAr (2x15+10kVAr)
- Bisa digunakan sampai suhu 55°C.

Bentuk kapasitor daya yang terdapat dipasaran adalah produksi Merlin Gerind Schneider Electric dengan Var plus M-1 dan M-4. Selanjutnya untuk memasang kapasitor daya tidak bisa langsung dipasang pada jaringan tegangan 3 fasa, tetapi dibuatkan panel dan dilengkapi dengan komponen pendukung lain untuk mengoperasikan sistem. Untuk mempersiapkan panel kapasitor bank, diperlukan komponen:

- Kapasitor bank 40kVAr,400V,50Hz,3ph11buah
- Reaktif power kontrol/regulator 12 step 1buah
- Kontaktor 3 kutub 11 buah
- NH fuse berikut holder 33 buah
- Saklar pemutus arus tiga kutub 1 buah
- Saklar pilih M-0-A 3 kutub 1 buah
- MCB 1 kutub 6A 3 buah
- Lampu indicator 220 V 14 buah
- Tombol tekan 22 buah
- Kipas angin exhaust fan 1 buah
- Lemari panel 1 buah

Setelah dilengkapi komponen kemudian dirakit sesuai dengan system yang diinginkan. Dalam pemasangan dengan system sentral dipasangkan dan dihubungkan pada panel utama yang mensuplai daya ke beban pabrik.

C. Evaluasi Teknis Penggunaan Motor Sinkron

Motor sinkron sumber daya reaktif setelah penggunaan kapasitor daya. Kalau kapasitor daya sumber daya reaktif yang berputar. Perbedaan ini merupakan tujuan pembahasan dan secara teknis telah diuraikan tentang pemakaian kapasitor daya, untuk motor sinkron:

1. Perbaikan factor daya dengan motor sinkron

Motor sinkron dapat memperbaiki factor daya, karena motor sinkron dapat bekerja pada induktif dan factor daya kapasitif. Sistem bekerjanya motor sinkron tergantung besarnya arus penguat magnet pada rotor. Daya yang dipergunakan power input dari motor sinkron adalah konstan karena beban dan tegangan sumber tetap. Jadi meskipun arus penguat diubah, VxIxcosφ tetap tidak berubah. Dengan mengatur arus magnet bila:

- a. Arus penguat kecil dari I_m normal, maka GGL induksi E lebih kecil dari tegangan sumber V, arus jangkar I_{A1} ketinggalan terhadap V sehingga motor induktif lagging.
- b. Arus penguat sedemikian sehingga GGL induksi E, sama dengan tegangan sumber V, arus jangkar I_{A2} akan sephasa dengan V sehingga motor bersifat resistif dan cos φ =1.
- c. Arus penguat besar sehingga GGL induktif E, lebih besar dari tegangan sumber V, maka arus jangkar I_{A3} mendahului V sehingga motor kapasitif.

2. Pemilihan dan pemasangan motor sinkron

Ditentukan besarnya daya motor sinkron sesuai dengan target cosφ yang diinginkan. Pada kasus ini target cosφ yang diinginkan 0,95 induktif. Dari

Tabel 2. Harga Motor Sinkron dan Panel Kontrol

No	Nama Barang	Merk	Harga/unit	Jml	Harga Total Rp
1.	MS 500kVA,1500rpm,50Hz	Stamford	345.000.000	1	345.000.000
2.	Kontaktor, 3P, 800A	Telemec	17.816.000	1	17.816.000
3.	Kontaktor, 3P, 25A	Telemec	241.000	1	241.000
4.	Thermal overload 800 A	Telemac	4.308.000	1	4.308.000
5.	Kontaktor relay 4P	Omron	200.000	1	200.000
6.	Discharge resistor	-		1	
7.	Rheostat	-		1	
8.	Reaktor	-		1	
9.	Sinkron relay	-		1	
10.	Panel 100x150x80mm	MG	38.500.000	1	38.500.000
Total					400.065.000

data beban bahwa daya aktif total beban 790 kW. Faktor daya rata-rata terukur 0,75 induktif, sedangkan factor daya target 0,95 induktif. Maka ditentukan besarnya factor daya motor sinkron yang akan dipilih dengan system vector. Dari Gambar dianalisa:

$$\begin{aligned} \text{Daya aktif } OM &= 790 \text{ kW.} \\ \text{Faktor daya } \cos \phi &= 0,75 \text{ induktif} \\ \angle \phi &= 42^\circ \\ \text{Daya nyata } OP &= OM / \cos \phi \\ &= 790 / 0,75 \text{ induktif} = 1053 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Faktor daya target } \cos \phi_{\text{target}} &= 0,95 \text{ induktif} \quad \angle \phi_{\text{target}} = 18^\circ \\ \text{daya nyata ON} &= OM / 0,95 \text{ induktif} \\ &= 790 / 0,95 \text{ ind} = 831,6 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} MP &= \sqrt{(OP)^2 - (OM)^2} \\ MP &= \sqrt{(1053)^2 - (790)^2} = 696,2 \text{ kVA} \\ MN &= OM \times \tan(\tan^{-1} 0,95) \\ MN &= 790 \times 0,33 = 260,7 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya motor sinkron:} \\ NP &= MP - MN \\ &= 696,2 - 260,7 \\ &= 435,5 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Bahwa daya input motor sinkron yang sesuai dengan perhitungan kapasitor daya untuk menaikkan faktor daya 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif 435,5 kVA. Daya motor yang ada dipasaran 350 kVA dan 500 kVA, maka daya motor yang dipilih 500 kVA. Kecepatan putaran motor 1500 rpm, frekuensi 50 Hz, dengan tegangan antar phasa 380 Volt. Untuk memasang motor sinkron harus dievaluasi sistem yang dipilih. Pemilihan sistem diperhatikan faktor teknis dan faktor ekonomis. Telah dijelaskan ada 4 cara menjalankan motor sinkron. Dari keempat cara yang paling ekonomis dan teknis paling sederhana dengan memberikan sumber DC statis untuk mensuplay penguatan medan motor. Dari Gambar ada dua yang diperhatikan untuk menjalankan motor sinkron yaitu tegangan AC 3 phasa dan tegangan DC untuk penguat medan. Dari diagram rangkaian, secara teknis komponen yang harus dipersiapkan. Komponen dipasang dalam panel sesuai dengan system dengan pemasangan kapasitor daya bank kapasitor, untuk motor sinkron dipasang secara sentral dihubungkan dengan panel

utama. Kapasitor bank semua komponen terdapat dalam box panel, untuk motor sinkron komponen kontrol saja yang terpasang dalam panel, sedangkan untuk motor sinkron harus disiapkan lokasi tersendiri.

V. PERBANDINGAN KAPASITOR DENGAN MOTOR SINKRON

A. Evaluasi Ekonomis Kapasitor Daya

Dengan menghitung harga total dari panel kapasitor yang akan disiapkan. Perhitungan diutamakan pada panel beserta perlengkapan, sedangkan perhitungan kabel penghubung ke panel utama dapat diabaikan. Harga yang tertera merupakan harga yang dipasaran berbagai produksi sesuai dengan fungsi masing-masing. Dari hasil perhitungan diperoleh harga total jika besarnya kapasitor yang akan disuplay 440 kVAr. Dari perhitungan jika perbaikan faktor daya dengan menggunakan kapasitor bank total daya reaktif 440 kVAr, diperlukan dana sebesar Rp. 160.026.000,-. Belum termasuk pemasangan panel dan kebutuhan kabel untuk panel utama. Pemasangan panel kapasitor bank diletakkan di samping panel utama.

B. Evaluasi Ekonomis Motor Sinkron

Seperti pada pemasangan panel kapasitor, untuk pemasangan perbaikan faktor daya dengan motor sinkron diperlukan sebuah panel kontrol untuk mengoperasikan motor sinkron. Kapasitor daya semua kapasitor diletakkan dalam panel, untuk motor sinkron diletakkan diluar panel dan hanya panel sinkron dipasang pada panel distribusi pabrik. Untuk menghitung motor sinkron tidak berupa harga motor, tetapi diasumsikan dengan harga generator sinkron dengan generator 500 kVA. Karena sulit ditemukan pemakaian motor sinkron untuk menemukan harga dari motor sinkron. Dan karena pada prinsipnya mesin serempak atau alternator sebagai generator atau motor, tanpa mengalami perbedaan konstruksi. Perincian harga motor sinkron serta panel kontrol:

Tabel 1. Harga Panel Kapasitor 440 kVAr

No	Nama Barang	Merk	Harga/unit	Jml	Harga total Rp
1.	Power Kapasitor 40kVAR	MG	4.863.500	11	53.498.500
2.	PFC Reg kontrol 12 step	MG	4.340.000	1	4.340.000
3.	Kontaktor 80A3P	Telemec	995.000	11	10.945.000
4.	MCCB 3pole/P/3Ph 800A	MG	10.512.000	1	10.512.000
5.	NH fuse 80A	LINDER	20.000	33	660.000
6.	Fuse Puller	LINDER	30.000	1	30.000
7.	Kontak pilihM-0-A3P	K&N	250.000	1	250.000
8.	MCB 1P 6A	MG	28.500	2	57.000
9.	Tombol tekan	Telemec	48.450	22	1.065.900
10.	Lampu indicator	Telemec	37.000	14	518.000
11.	Exhaust fan+Thermostad	National	250.000	1	250.000
12.	CT .../5A	AEG	150.000	1	150.000
13.	Panel 200x150x80mm	MG	78.750.000	1	79.750.000
Total					160.026.000

Catatan: Belum termasuk komponen synkronising relay, reaktor, discharge

Harga komponen untuk pemakaian motor sinkron sebagai sumber daya reaktif diam, bahwa biaya yang disiapkan lebih besar dari pemakaian kapasitor daya bank kapasitor sebesar Rp. 400.065.000; Harga belum termasuk harga komponen dan biaya pemasangan. Secara ekonomis penggunaan motor sinkron sebagai kompensator sangat mahal, jika dibandingkan: $\frac{\text{Bank Kapasitor}}{\text{Motor sinkron}} = \frac{\text{Rp.160.026.000;}}{\text{Rp.400.065.000;}} = \frac{1}{2,5}$

Bahwa jika menaikkan faktor daya dengan menggunakan motor sinkron biaya hampir 250% lebih mahal dari jika kapasitor daya dengan hasil perbaikan faktor daya nilai sama 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif.

VI. KESIMPULAN

Dari pembahasan antara kapasitor daya dengan motor sinkron untuk memperbaiki faktor daya, maka:

- Secara ekonomis penggunaan motor sinkron sebagai kompensator sangat mahal, perbandingan antara bank Kapasitor dengan Motor sinkron 1:2,5. Jika menaikkan faktor daya dengan menggunakan motor sinkron biaya bisa 250% lebih mahal dari jika kapasitor daya dengan hasil perbaikan faktor daya nilai sama 0,75 induktif menjadi 0,95 induktif.
- Keuntungan yang diperoleh dari peningkatan faktor daya pada sistem distribusi tegangan rendah adapun meningkatkan penggunaan daya kapasitas daya terpasang bisa dimasimalkan. Menghilangkan denda kVArh yang ditetapkan PLN, yang menetapkan $\cos\phi$ terendah 0,85 induktif atau pemakaian total kVArh tidak lebih 60% dari total kWh perbulan. Dan meningkatkan efisiensi daya listrik dengan dilakukan penambahan beban listrik dalam kW dalam batas kemampuan daya.
- Keuntungan perbaikan faktor daya dengan kapasitor daya, bahwa kapasitor daya umumnya sudah dalam bentuk kapasitor bank, dimana dalam satu bank sudah jelas besar daya reaktif yang diinginkan. Untuk merakit panel kapasitor bank hanya diperlukan komponen proteksi dan penghubung. Pemasangan kapasitor daya diletakkan dalam suatu panel kapasitor. Kapasitor daya dan komponen tambahan untuk pengoperasian, mudah memperolehnya. Adapun kerugian perbaikan faktor daya dengan kapasitor daya, bahwa kapasitor daya merupakan sumber daya reaktif statis, maka berfungsi hanya sebagai kompensator.
- Keuntungan perbaikan faktor daya dengan motor sinkron, karena motor sinkron merupakan sumber daya reaktif dinamis, maka berfungsi untuk kompensator juga sebagai motor penggerak. Adapun kerugian perbaikan faktor daya dengan motor sinkron, besar daya

reaktif yang disuplai dari motor sinkron tidak tetap, tergantung dari besar arus pengasutan pada penguatan medan. Menjalankan motor sinkron diperlukan cara khusus dan komponen tambahan khusus. Memasang motor sinkron lokasi lebih luas dan tahan getaran, karena motor sinkron tidak dalam panel, yang dalam panel hanya komponen kontrol. Motor sinkron jarang digunakan karena sulit untuk memperolehnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. ABB Inc, Low Voltage Capacitor Bank Catalog 2013
2. ABB Inc, Low Voltage Network Quality Catalog 2013
3. Schneider Electric, Power Factor Corection, Panel Builder 2012
4. Groupe Schneider, Electrical Installation Guide, According to IEC International Standard, Technical series, France 2016.
5. Olle L. Elgerd, Electric Energy Systems Theory, Tata Mc. Graw Hill Publishing Company Lymited New Delhi.
6. Schneider Electric, Seminar Efisiensi Pemakaian Energi Listrik dengan Kapasitor, Jakarta 2016.
7. Schneider Electric. Katalog dan Daftar Harga Komponen, Jakarta 2016.
8. Prof. Ir Abdul Kadir, Mesin Serempak, Penerbit Djambatan 1981.
9. Perusahaan Listrik Negara PLN, tentang Pembayaran Tenaga Reaktif kVArh.
10. Standard IEEE 18-2012, IEEE Standard For Shunt Power Capacitors
11. Teknik Tenaga Listrik, A. Arismunandar
12. Dasar Teknik Tenaga Listrik, Zuhul.
13. William D. Stevenson, Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1984.