

Evaluasi Arus Asut Y- Δ dengan Kapasitor Tambahan pada Motor Listrik Pompa Re-injeksi di Area Panas Bumi Lahendong

Monika Susan Mumu, Ir. M. Pakiding, MT., Ir. A. F. Nelwan, MT., Ir. F. Lisi, MT.
Jurusan Teknik Elektro-FT. UNSRAT, Manado-95115, Email: monikamumu@gmail.com

Abstract-- One of the matter about operation of induction motor is starting motor. Starting motor usually is the big problem on operation of motor because its starting current. Hence, to reduce starting current, so used method of reduced voltage. In this research using Y- Δ starter infuse capacitor. Purpose of this thesis is to evaluate behavior of induction motor when starting and running, to show current and voltage rate when starting and running, and to explain about impact of capacitor on Y- Δ starter infuse capacitor. The result of this measurement showed that capacitor gives impact to reduce starting current. On Y- Δ starter (without capacitor), starting current is 278 [A], whereas on Y- Δ starter infuse capacitor (70 [kVAr]), starting current is 243.4 [A]

Keywords : Capacitor, Induction motor, Infuse capacitor, Starting current.

Abstrak-- Salah satu hal yang harus dipertimbangkan dalam pengoperasian motor induksi yaitu pengasutan (*starting*) motor. Pengasutan motor ini yang biasanya menjadi masalah besar dalam pengoperasian motor. Oleh karena itu untuk mengurangi arus asut maka digunakan metode penurunan tegangan. Pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu pengasutan Y- Δ infuse capacitor. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku motor pada saat pengasutan dan pengoperasional motor induksi, memperlihatkan besar arus dan tegangan pada saat pengasutan dan pengoperasian motor induksi, dan menjelaskan bagaimana pengaruh penambahan kapasitor pada rangkaian pengasutan Y- Δ . Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kapasitor memberi pengaruh dalam penurunan besar arus asut. Pada pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor, besar arus asut yang diukur adalah 278 [A], sedangkan pada pengasutan Y- Δ infuse capacitor (70 [kVAr]), besar arus asut yang diukur adalah 243,4 [A].

Kata kunci : Arus asut, Infuse capacitor, Kapasitor, Motor induksi.

I. PENDAHULUAN

Energi geothermal adalah energi panas yang diambil dari dalam bumi. Energi ini diperoleh dalam bentuk uap atau air panas, yang mana uap ini sering dikenal dengan sebutan uap panas bumi. Pada lapangan panas bumi terdapat fasilitas-fasilitas produksi panas bumi, seperti : Sumur panas bumi, *Manifold*, Pipa alir, *Separator*, *Scrubber*, *Silencer*, *Condensate traps*, *Rock muffler*, Kolam pendingin (*cooling pond*), dan pompa reinjeksi.

Pompa reinjeksi ini berfungsi untuk mengalirkan kembali fluida sisa hasil produksi ke dalam perut bumi. Hal ini dilakukan untuk menjaga cadangan air dalam perut bumi yang berpengaruh pada produksi uap. Pompa reinjeksi ini menggunakan motor induksi 3 fasa. Salah satu hal yang harus

dipertimbangkan dalam pengoperasian motor induksi yaitu pengasutan (*starting*) motor. Pengasutan motor ini yang biasanya menjadi masalah besar dalam pengoperasian motor. Secara khusus yaitu masalah arus asut. Biasanya pada motor induksi, besarnya arus asut yaitu 6 kali dari arus nominal motor. Arus menjadi besar dan akan mengganggu sistem instalasi. Hal ini bisa berpengaruh pada banyak hal, seperti penggunaan kabel, penggunaan pengaman, dan penggunaan transformator. Oleh karena itu maka dibutuhkan suatu rangkaian untuk mengontrol arus asut pada motor induksi tersebut. Dengan arus asut yang lebih rendah, maka kualitas listrik menjadi lebih baik.

Seiring dengan berkembangnya teknologi, banyak perusahaan industri yang menuntut sistem pengoperasian motor yang lebih efisien. Salah satu hal yang berpengaruh terhadap pengoperasian motor yang efisien yaitu pengasutan motor. Terdapat beberapa metode pengasutan motor induksi, antara lain Pengasutan Hubungan Langsung (*Direct On Line starter*), Pengasutan Y- Δ , *Soft starter*, *Variable Frequency Drive* atau *Variable Speed Drive*. Adapun metode pengasutan yang akan dibahas pada tugas akhir ini yaitu metode Pengasutan Y- Δ . Rangkaian Pengasutan Y- Δ ini kemudian dikembangkan dengan menambahkan kapasitor untuk melihat bagaimana perilaku motor pada saat pengasutan (*starting*) atau pada saat motor beroperasi (*running*). Sehingga judul penulisan ini yaitu "Evaluasi Arus Asut Y- Δ dengan Kapasitor Tambahan pada Motor Listrik Pompa Re-injeksi di Area Panas Bumi Lahendong."

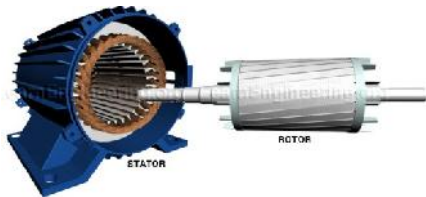
II. LANDASAN TEORI

A. Mesin-mesin Listrik

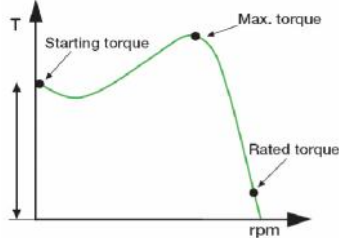
Mesin-mesin listrik digunakan untuk mengubah suatu bentuk energi ke energi yang lain, misalnya mesin yang mengubah energi mekanis ke energi listrik disebut generator, dan sebaliknya energi listrik menjadi energi mekanis disebut motor. Masing-masing mesin mempunyai bagian yang diam dan bagian yang bergerak. Jenis pertama dari mesin AC adalah mesin sinkron (*synchronous machine*). Jenis kedua yaitu mesin asinkron (*asynchronous machine*).

Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi adalah alat listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi sering juga disebut motor tidak serempak atau motor asinkron. Konstruksi motor induksi terdiri dari stator dan rotor. (Lihat Gambar 1).



Gambar 1. Stator dan Rotor



Gambar 2. Karakteristik Torka Tipe Motor Sangkar-tupai
Sumber: Softstarter Handbook, ABB

Prinsip Kerja

Prinsip kerja motor induksi atau terjadinya putaran pada motor, bisa dijelaskan dalam sembilan prinsip yang akan diuraikan selanjutnya : Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan $N_s = 120f/P$. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus (I). Adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor yang cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Seperti telah dijelaskan pada (3) tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (N_s) dengan kecepatan berputar rotor (N_r). Perbedaan kecepatan antara (N_s) dan (N_r) disebut slip (S). Bila (N_r) = (N_s), tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila (N_r) lebih kecil dari (N_s).

Kecepatan dan Slip^[1]

Kecepatan dari sebuah motor induksi bergantung pada 2 hal yaitu jumlah kutub pada belitan stator dan frekuensi. Untuk menghitung kecepatan sinkron motor digunakan rumus sebagai berikut :

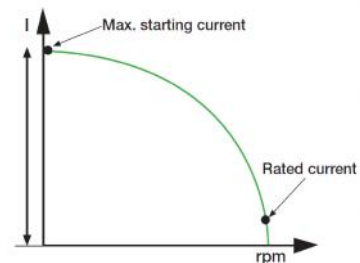
$$N_s = \frac{120f}{P} \tag{1}$$

Dengan:

- N_s = kecepatan [rpm]
- f = frekuensi [Hz]
- P = jumlah kutub

Perbedaan antara kecepatan sinkron dan asinkron dinamakan slip/S. Untuk menghitung slip (S) digunakan rumus sebagai berikut :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \tag{2}$$



Gambar 3. Karakteristik Arus
Sumber: Softstarter Handbook, ABB

Dengan:

- S = Slip
- N_s = Kecepatan sinkron [rpm]
- N_r = Kecepatan rotor [rpm]

Torka^[1]

Torka awal motor bergantung pada besarnya daya motor. Pada motor kecil (≤ 30 kW), normalnya memiliki nilai torka awal antara 2,5 sampai 3 kali dari torka nominal, dan untuk motor medium (≤ 250 kW) memiliki nilai torka antara 2 sampai 2,5 dari torka nominal. (Lihat Gambar 2)

Torka Nominal (Full-load Torque)

Torka nominal motor dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$M_r = \frac{9550 \times P_r}{n_r} \tag{3}$$

Keterangan :

- M_r = Torka nominal (Nm)
- P_r = Daya motor (kW)
- n_r = Kecepatan motor (rpm)

Karakteristik Arus^[1]

Karakteristik arus pada motor induksi terlihat pada Gambar 3. Terlihat bahwa arus pada saat pengasutan (*starting*) sangat besar dibandingkan dengan arus nominalnya, dan arusnya berkurang sampai mendekati arus nominal seiring bertambahnya kecepatan putaran motor.

B. Karakteristik Pengasutan Motor Induksi 3 Fasa^[3]

Secara umum, motor induksi dapat diasut baik dengan menghubungkan motor secara langsung ke rangkaian pencatu ataupun dengan mengenakan tegangan yang telah dikurangi ke motor selama periode asut. Tidak seperti motor dc, motor induksi dapat dihubungkan langsung ke jala-jala tanpa merusak motor. Tetapi, karena adanya gangguan tegangan pada saluran catu yang diciptakan oleh arus asut yang besar, motor-motor yang lebih besar, motor-motor yang lebih besar dari pada 7.5 sampai 10 HP kerap kali diasut pada tegangan yang telah diturunkan. Nilai dayakuda maksimum motor yang diizinkan untuk diasut pada tegangan penuh bergantung pada rancangan motor, kapasitas pencatu, dan peraturan dari pemilik saluran pencatu.

Motor yang diasut pada tegangan-penuh akan menghasilkan torka asut yang lebih besar dibanding jika motor diasut pada tegangan yang dikurangi. Kenyataannya, dapat ditunjukkan bahwa torka motor induksi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan yang dikenakan. Maka jika selama

saat asut tegangan dikurangi hingga mencapai 80% dari harga seharusnya, torka asut hanya mencapai 64% dari yang diperoleh apabila diasut dengan tegangan penuh. Tegangan yang dikurangi yang dikenakan pada motor selama periode asut akan mengurangi arus asut, dan pada saat yang sama menambah waktu percepatan karena torka asut yang kurang. Jenis beban yang akan diasut juga harus menjadi perhatian dalam menentukan cara asut yang akan digunakan. Pengasut yang biasa digunakan dan akan dijelaskan disini adalah sebagai berikut:

Pengasut tegangan penuh atau pengasut pada saluran (*across-the-line starter*). Pengasut dengan tegangan yang diturunkan (*reduced-voltage starter*) yaitu Pengasutan Y-Δ, Pengasutan *Soft Starting*, Pengasutan Frequency Converter

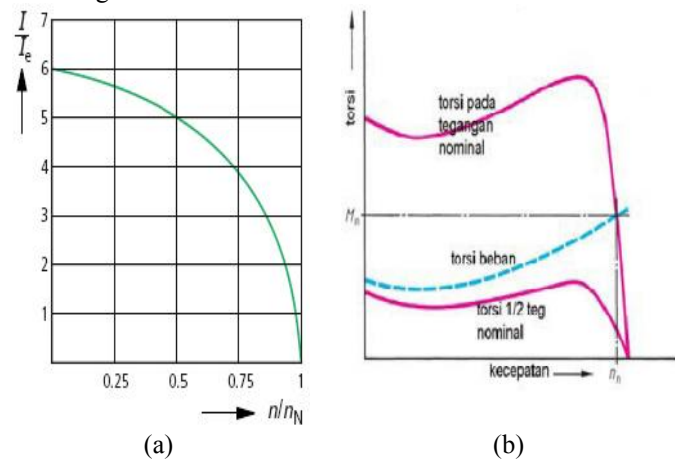
Pengasutan Hubungan Langsung (Direct-On Line / DOL)

Metode pengasutan ini merupakan metode yang paling sederhana. Ketika pengasutan dimulai motor induksi akan menarik arus yang besarnya sampai 6 kali arus nominalnya. Secara berangsur-angsur ketika kecepatan motor mendekati nominalnya maka arus motor akan berada pada kondisi nominalnya. Dan selama pengasutan, torka awal sangat besar, dan lebih besar dari torka yang dibutuhkan untuk banyak aplikasi. Torka yang besar memberikan tekanan yang tidak perlu terhadap rotor.

Saat motor induksi diasut secara langsung, arus awal motor besar, yang dapat menyebabkan jatuh-tegangan yang besar pada pasokan tegangan PLN. (Lihat Gambar 4a dan 4b). Untuk motor daya kecil sampai 5 KW, arus pengasutan tidak berpengaruh besar terhadap jatuh-tegangan. Tetapi pada motor dengan daya diatas 30 KW sampai dengan 100 KW, arus asut yang besar akan menyebabkan jatuh-tegangan yang besar dan menurunkan kualitas listrik.

Pengasutan Y-Δ

Motor induksi dirangkai dengan rangkaian pengasuta Y-Δ. Metode pengasutan Y-Δ ini merupakan metode pengasutan dengan penurunan tegangan (lihat Gambar 5). Pada saat pengasutan, belitan stator dihubungkan Y dan setelah putaran rotor mencapai putara nominal, barulah belitan stator dihubungkan Δ.



Gambar 4. (a) Karakteristik Arus dan (b) Karakteristik Torka Pengasutan Hubungan Langsung
Sumber : Teknik Listrik Industri, Jilid 2

Bila stator dihubungkan Y, maka

Tiap belitan mendapatkan tegangan sebesar $U/\sqrt{3}$
Sehingga arus yang mengalir di tiap belitan sebesar I_{FY}
Arus yang mengalir di tiap belitan akan sama dengan arus fasa I_Y

Bila stator dihubungkan Δ, maka:

Tiap belitan mendapatkan tegangan sebesar U
Sehingga arus yang mengalir di tiap belitan sebesar $I_{fΔ}$
Arus fasa untuk belitan delta : $I_{Δ} = \sqrt{3}I_{fΔ}$

Gambar 6 menjelaskan perubahan belitan itu, sekaligus perubahan tegangan dan arus.

Bila dibandingkan

$$I_{FY} = \frac{I_{fΔ}}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

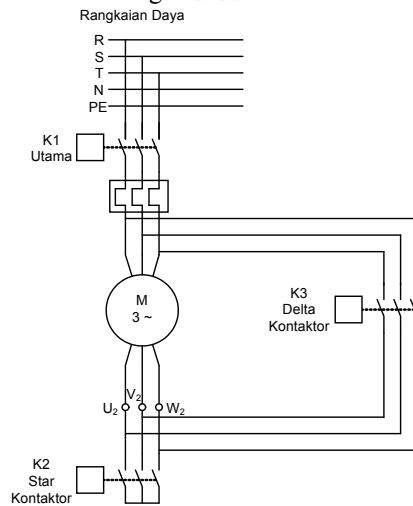
Karena belitan stator mendapatkan tegangan $U/\sqrt{3}$. Mengingat $I_{FY} = I_Y$.

$$I_Y = \frac{I_{fΔ}}{\sqrt{3} \cdot 3I_{fΔ}} \tag{5}$$

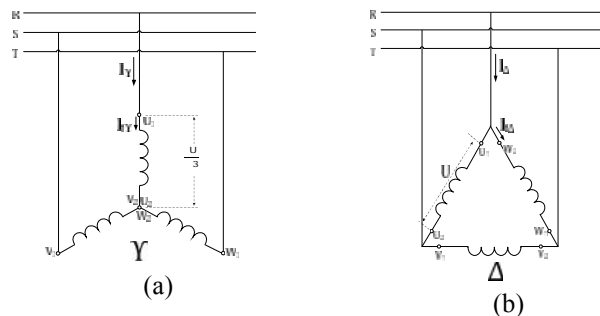
Sehingga,

$$I_Y = \frac{1}{3} I_{Δ} \tag{6}$$

Artinya, bila belitan stator dihubungkan star maka arus fasa yang ditarik dari jaringan hanya 1/3 dibandingkan bila stator dihubungkan delta. Namun, bila dihubungkan star, torka yang dihasilkan hanya 1/3 dibandingkan bila dihubungkan delta. Hal ini terjadi karena tegangan yang diterima tiap belitan hanya $U/\sqrt{3}$, sedangkan torka dengan tegangan memiliki hubungan kuadratis.



Gambar 5. Pengawatan Pengasutan Y-Δ



Gambar 6. (a) Hubungan Belitan, Tegangan, Arus Y dan (b) Hubungan Belitan, Tegangan, Arus Δ

Pada hubungan Y arus fasa maupun arus saluran serta daya lebih rendah dari arus dan daya pada hubungan Δ. Inilah prinsip pengasutan Y-Δ untuk motor asinkron. Motor diasut pada hubungan Y kemudian hubungan diubah ke Δ setelah motor berjalan. Dengan demikian arus pada waktu pengasutan tidak terlalu tinggi.

Karakteristik arus fungsi putaran $I=f(n)$ pengasutan Y-Δ (lihat Gambar 7a). Ketika motor terhubung bintang (Y), arus pengasutan dua kali arus nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung segitiga (Δ) arus motor meningkat empat kali arus nominalnya. Secara berangsur-angsur arus motor menuju nominal saat putaran motor nominal.

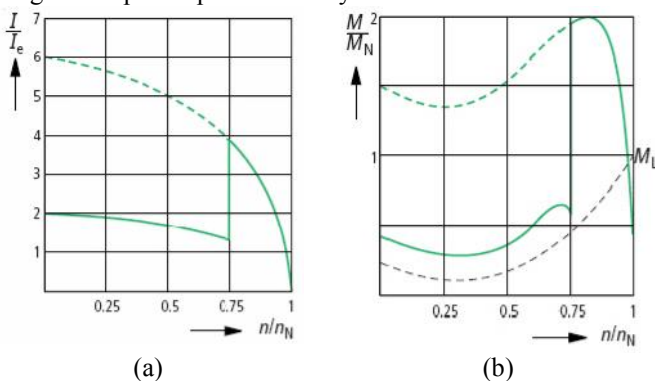
Karakteristik torka fungsi putaran $T=f(n)$ pengasutan Y-Δ (lihat Gambar 7b). Ketika motor terhubung bintang, torka awal sebesar setengah dari torka nominalnya sampai 75% dari putaran nominal. Ketika motor terhubung Δ torka motor meningkat menjadi dua kali lipat torka nominalnya. Secara berangsur-angsur torka motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.

Pengasutan Soft Starting^[11]

Pengasutan *Soft starting* menggunakan komponen *solid-state*, yaitu enam buah *Thyristor* yang terhubung antiparalel. Karakteristik arus fungsi putaran $I=f(n)$ pada pengasutan *soft starting*, memperlihatkan grafik arus pengasutan besarnya tiga kali arus nominalnya sampai motor mencapai putaran mendekati 85% (lihat Gambar 8a). Arus motor berangsur-angsur menuju arus nominalnya ketika putaran motor mendekati nominalnya. Pengasutan *solid state* makin diminati karena harganya ekonomis dan handal.

Karakteristik torka fungsi putaran $T=f(n)$ pengasutan *soft starting*, memperlihatkan torka awal sebesar setengah dari torka nominalnya, berangsur-angsur torka meningkat mendekati 140% torka saat putaran mendekati 90% nominalnya (lihat Gambar 8b). Secara berangsur-angsur torka motor mendekati nominal saat putaran motor nominal.

Metode pengasutan ini dipergunakan untuk memperhalus pengasutan motor. Prinsip kerjanya yaitu dengan mengatur tegangan yang masuk pada motor. Awalnya motor hanya diberikan tegangan yang rendah sehingga arus dan torkanya juga rendah. Selanjutnya tegangan dinaikkan secara bertahap sampai ke tegangan nominalnya dan motor akan bekerja dengan kecepatan rpm nominalnya.



Gambar 7. (a) Karakteristik Arus dan (b) Karakteristik Torka Pengasutan Y-Δ

Sumber : Teknik Listrik Industri, Jilid 2

Pengasutan Frequency Converter^[11]

Metode ini dikenal juga dengan nama VSD (*Variable Speed Drive*) atau VFD (*Variable Frequency Drive*). VSD merupakan metode pengasutan dengan mengatur frekuensi sesuai dengan persamaan pada motor : $N_s = 120f / P$, dimana f merupakan frekuensi sistem dan P adalah jumlah kutub pada motor. VSD ini menggunakan sifat motor yang sesuai dengan persamaan di atas.

Dengan metode ini, jika frekuensi dinaikkan maka kecepatan juga naik, sebaliknya jika frekuensi diperkecil, maka kecepatan motor juga akan berkurang. Pengendalian frekuensi motor dapat menggunakan rangkaian inverter. VSD ini terdiri dari dua bagian utama yaitu penyearah tegangan AC ke DC dan bagian kedua yaitu inverter untuk mengubah DC ke AC dengan frekuensi yang diinginkan.

C. Perbaikan Faktor Daya

Daya 3 Fasa^[12]

Hampir semua listrik yang digunakan oleh industri, dibangkitkan, ditransmisikan, dan didistribusikan dalam sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa ini memiliki besar yang sama (untuk tegangan atau arus) tetapi mempunyai perbedaan sudut sebesar 120° antarfasanya. Sumbu ini disebut juga sumbu yang seimbang.

Apabila sumber mensuplai sebuah beban seimbang, maka arus-arus yang mengalir pada masing-masing penghantar akan memiliki besar yang sama dan berbeda sudut fasa sebesar 120° satu sama lain. Arus-arus ini disebut arus seimbang.

Terdapat dua hubungan beban yang seimbang yaitu Terhubung secara bintang (Y), Terhubung secara delta (Δ)

Daya Total pada hubungan delta (P_T)

$$P = \sqrt{3} \times V_H \times I_1 \times \cos \phi \tag{7}$$

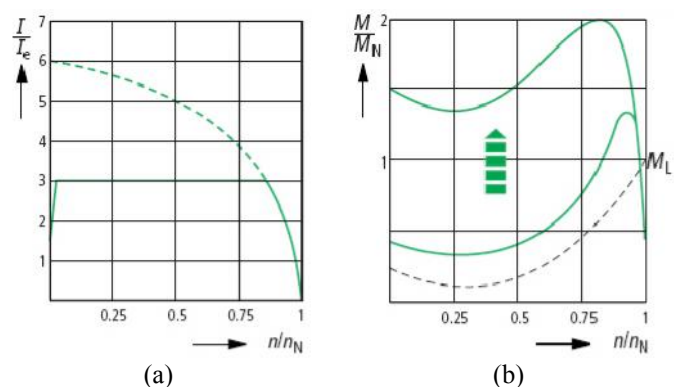
Perhitungan arus 3 fasa :

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_H \times \cos \phi} \tag{8}$$

Dimana

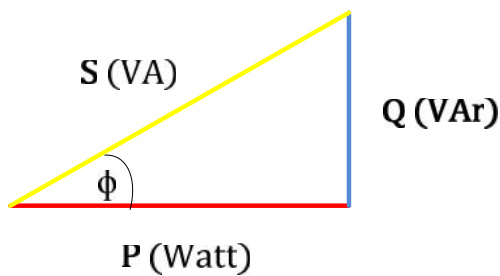
V_H = Tegangan fasa ke fasa

I_1 = Arus fasa



Gambar 8. (a) Karakteristik Arus dan (b) Karakteristik Torka Pengasutan *Soft Starting*

Sumber : Teknik Listrik Industri, Jilid 2



Gambar 9. Segitiga Daya.

Faktor Daya

Daya nyata (*real power, P*)^[4] adalah daya rerata yang diserap beban. Satuan daya nyata adalah watt. Daya reaktif (*reactive power, Q*) adalah daya reaktif (dari kata reaktansi, X) yang diserap beban. Satuan daya reaktif adalah VAr. Daya Semu/*Apparent Power (S)*^[12] merupakan perkalian antara tegangan dengan arus. Satuan daya semu adalah VA.

Hubungan antara daya nyata (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S) (lihat Gambar 9). Inilah yang disebut dengan segitiga daya. Perbandingan antara daya nyata dengan daya semu disebut faktor daya (PF) (*power factor, cos φ*).

$$PF = \frac{P}{VI} = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \cos \phi \tag{9}$$

Dalam sistem tenaga listrik dikenal 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya *unity*, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem. Faktor daya *unity* adalah keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah satu dan tegangan sefasa dengan arus. Faktor daya *unity* akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni. Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut : Beban/peralatan listrik yang memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif dan sebuah rangkaian dalam mana arus (I) terbelakang dari tegangan (V). Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut : Beban/ peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif dan sebuah rangkaian dalam mana arus mendahului tegangan.

Kapasitor untuk Memperbaiki Faktor Daya

Faktor daya dapat diperbaiki dengan memasang kapasitor pengkoreksi faktor daya pada sistem distribusi/instalasi listrik di pabrik/industri. Kapasitor bertindak sebagai pembangkit daya reaktif dan oleh karenanya akan mengurangi jumlah daya reaktif, juga daya semu yang dihasilkan oleh bagian utilitas.

Perhatikan Gambar 10.

Perhatikan Gambar 10.
 Perhatikan segitiga daya awal (S₁)
 $\sin \phi_1 = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{Q_L}{S_1}$ (10)

$P = S_1 \cos \phi_1$ (11)

Perhatikan segitiga daya setelah (S₂)
 Perhatikan segitiga daya setelah (S₂)
 $\sin \phi_2 = \frac{Q_2}{S_2} = \frac{Q_L - Q_C}{S_2}$ (12)

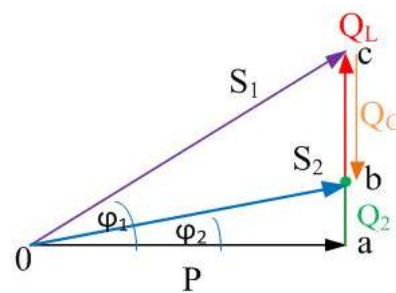
$P = S_2 \cos \phi_2$ (13)

Menghitung besar nilai Q_C
 $\frac{Q_C}{S_2} = \frac{Q_L - Q_C}{S_2} = \sin \phi_2$ (14)

$\frac{Q_C}{S_2} = \frac{Q_L}{S_2} - \sin \phi_2$ (15)

$Q_C = S_2 (\sin \phi_1 - \sin \phi_2)$ (16)

$Q_C = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ (17)



Gambar 10. Diagram Phasor Perbaikan Faktor Daya

Jadi, untuk mengetahui daya reaktif kapasitor untuk perbaikan faktor daya digunakan rumus di bawah ini:

$$Q_C = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \tag{18}$$

Keterangan :

Q_C = Daya Reaktif Kapasitor (VAr)

P = Daya Aktif (W)

φ₁ = Sudut Daya mula-mula

φ₂ = Sudut Daya yang diinginkan

Kapasitansi Kapasitor:

$$C = \frac{Q_C}{V^2 \times 2\pi \times f} \tag{19}$$

Kapasitor Tegangan Rendah^[5]

Kapasitor tegangan rendah dipasang pada masing-masing sistem saluran distribusi atau motor-motor para langganan untuk mengurangi kerugian sistem dan memperbaiki tegangan maupun kemampuan sistem. Sebagai keuntungan tambahan bagi konsumen antara lain turunnya kVA yang dibutuhkan, kerugian daya dan tegangan yang stabil. Keuntungan optimum yang diinginkan dari kapasitor banyak tergantung pada kedudukan kapasitor yang tepat dalam sistem.

Ukuran Kapasitor untuk Motor-motor

Ukuran kapasitor harus dibuat sedemikian rupa sehingga arus kapasitor tidak melampaui arus beban motor pada tegangan nominal. Kalau tidak, akan ada tegangan tinggi bila mesin berhenti. Sesuai IS: 2834-1964 batas kapasitor yang dihubungkan langsung dibatasi sampai dengan 90% KVAR magnet motor.

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian ini dilakukan di lapangan panas bumi PT. PGE area panas bumi Lahendong. Penelitian dilaksanakan dari Januari sampai dengan April 2013.

B. Bahan dan Alat Perlengkapan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut : Laptop, Buku-buku teks, Literatur-literatur dari internet, Multimeter, *Clamp Meter*.

C. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri atas 2 tahap, tahap pertama merupakan tahap persiapan penelitian, dan tahap kedua yaitu tahap pelaksanaan penelitian. Penelitian berupa pengukuran

arus dan tegangan pada motor induksi 3 fasa, dengan pengasutan motor menggunakan pengasut Y-Δ infuse capacitor.

D. Prosedur Pengukuran dan Perhitungan

Prosedur Pengukuran Arus dan Tegangan pada Motor Induksi

Karena keterbatasan alat ukur, maka pengukuran arus dan pengukuran tegangan dilakukan terpisah. Pengukuran pertama untuk arus, dan pengukuran kedua untuk tegangan.

Pengukuran Arus.

- Kondisi I : Pengasutan Y-Δ (tanpa kapasitor),
- Kondisi II : Rangkaian Pengasutan Y-Δ Infuse Capacitor.

Pengukuran Tegangan

- Kondisi I : Rangkaian pengasutan Y-Δ (tanpa kapasitor).
- Kondisi II : Rangkaian Pengasutan Y-Δ Infuse Capacitor.

Prosedur Perhitungan untuk Mendapatkan Daya Reaktif Kapasitor

Perhitungan Arus Nominal, Perhitungan Daya Reaktif, Perhitungan Kapasitansi Kapasitor, Perhitungan Biaya Kelistrikan



Gambar 11. Motor Induksi 3 Fasa



Gambar 12. Pompa Reinjeksi

TABEL I. SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI

Jumlah Kutub	: 2
Daya	: 100 [HP], 75 [kW]
Kecepatan putaran Rotor (N)	: 2950 [rpm]
Ins.	: F
Amb.	: 40° [C]
Frame Size	: 250MA
Arus (I)	: 138 [A]
IP.	: W55
Weight	: 480 [kg]
Merk	: Teco

E. Gambaran Umum Lapangan Produksi Panas Bumi

Adanya suatu sistem panas bumi di bawah permukaan sering kali ditunjukkan oleh adanya manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*), seperti mata air panas, kubangan lumpur panas (*mud pools*), geyser dan manifestasi panas bumi lainnya. Dimana beberapa diantaranya, yaitu mata air panas, kolam air panas sering dimanfaatkan oleh masyarakat setempat untuk mandi, berendam, mencuci, masak, dll. Manifestasi panas bumi di permukaan diperkirakan terjadi karena adanya perambatan panas dari bawah permukaan atau karena adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan.

Berikut ini fasilitas produksi panas bumi: sumur panas bumi, *Manifold*, Pipa alir, *Separator*, *Scrubber*, *Silencer*, *Condensate Traps*, *Rock muffler*, Kolam pendingin (*cooling pond*), Pompa reinjeksi.

Pompa reinjeksi berfungsi untuk memompakan air dari kolam pendingin kembali ke sumur reinjeksi yang diharapkan sebagai penyeimbang tekanan dalam reservoir (Lihat Gambar 11 dan Gambar 12).

F. Spesifikasi Motor Induksi

Spesifikasi motor induksi 3 fasa lapangan panas bumi PT Pertamina Geothermal Energy Area Panas Bumi Lahendong dapat dilihat pada TABEL I.

G. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Motor Induksi 3 Fasa (TABEL II dan TABEL III)

TABEL II. DATA HASIL PENGUKURAN ARUS (T = 0-1 S S/D T = 4 S)

FASA	ARUS														
	$I_{m=0.1s}$ [A]				$I_{m=0.2s}$ [A]				$I_{m=0.3s}$ [A]						
	no C	Qc [kVAh]			no C	Qc [kVAh]			no C	Qc [kVAh]					
	70	50	20	10	70	50	20	10	70	50	20	10			
R ₁	256,0	215,0	291,1	278,2	293,3	70,5	60,9	67,9	60,9	64,1	68,5	88,1	67,0	60,9	64,4
R ₂	298,0	248,1	295,3	273,1	283,0	72,6	61,3	66,7	60,6	61,9	68,0	61,1	67,6	60,1	61,1
R ₃	272,0	266,8	298,1	269,6	287,7	66,8	70,3	67,9	51,3	78,7	67,4	61,5	66,9	60,5	63,3
S ₁	285,0	264,4	297,1	281,3	292,4	69,6	62,1	81,5	53,4	65,4	68,8	62,1	69,1	62,7	66,2
S ₂	262,2	219,8	297,3	278,7	292,1	69,1	61,7	69,6	52,7	65,0	68,9	63,1	69,1	62,7	65,0
S ₃	275,6	251,6	299,3	275,9	281,6	78,6	61,7	70,0	52,7	66,0	68,7	62,1	68,8	62,6	61,8
T ₁	271,6	260,1	299,9	278,2	281,1	67,0	60,3	65,1	51,0	62,3	66,1	81,3	65,2	60,2	62,1
T ₂	270,0	263,0	293,7	274,6	287,4	66,5	59,0	65,7	51,0	62,8	66,2	63,1	65,5	60,1	61,5
T ₃	275,4	244,8	291,7	271,6	284,2	67,2	60,4	65,9	60,6	61,7	66,1	73,5	65,7	60,4	61,6

TABEL III. DATA HASIL PENGUKURAN ARUS (T = 6 S S/D T = 12 S)

FASA	ARUS														
	$I_{m=0.1s}$ [A]				$I_{m=0.2s}$ [A]				$I_{m=0.3s}$ [A]						
	no C	Qc [kVAh]			no C	Qc [kVAh]			no C	Qc [kVAh]					
	70	50	20	10	70	50	20	10	70	50	20	10			
R ₁	256,0	215,0	291,1	278,2	293,3	70,5	60,9	67,9	60,9	64,1	68,5	88,1	67,0	60,9	64,4
R ₂	298,0	248,1	295,3	273,1	283,0	72,6	61,3	66,7	60,6	61,9	68,0	61,1	67,6	60,1	61,1
R ₃	272,0	266,8	298,1	269,6	287,7	66,8	70,3	67,9	51,3	78,7	67,4	61,5	66,9	60,5	63,3
S ₁	285,0	264,4	297,1	281,3	292,4	69,6	62,1	81,5	53,4	65,4	68,8	62,1	69,1	62,7	66,2
S ₂	262,2	219,8	297,3	278,7	292,1	69,1	61,7	69,6	52,7	65,0	68,9	63,1	69,1	62,7	65,0
S ₃	275,6	251,6	299,3	275,9	281,6	78,6	61,7	70,0	52,7	66,0	68,7	62,1	68,8	62,6	61,8
T ₁	271,6	260,1	299,9	278,2	281,1	67,0	60,3	65,1	51,0	62,3	66,1	81,3	65,2	60,2	62,1
T ₂	270,0	263,0	293,7	274,6	287,4	66,5	59,0	65,7	51,0	62,8	66,2	63,1	65,5	60,1	61,5
T ₃	275,4	244,8	291,7	271,6	284,2	67,2	60,4	65,9	60,6	61,7	66,1	73,5	65,7	60,4	61,6

IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

A. Evaluasi Hasil Pengukuran

Penelitian ini diterapkan pada pompa reinjeksi PT. Pertamina Geothermal Energy area Lahendong, dimana motor yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa dengan daya 75 [kW](100 [Hp]), (Lihat Gambar 16). Pada saat pengukuran di lapangan, jenis pengasutan dibagi dalam 5 jenis, yaitu: Pengasutan Y-Δ (Kondisi I), Pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 70[kVAr]$ (Kondisi II), Pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 50[kVAr]$ (Kondisi III), Pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 20[kVAr]$ (Kondisi IV), dan Pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 10 [kVAr]$ (Kondisi V).

Evaluasi Arus

Perhatikan TABEL IV

Pada $t = 0-1$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I yaitu 266.0 [A], Kondisi II yaitu 215.0 [A], Kondisi III yaitu 291.0 [A], Kondisi IV yaitu 276.2[A], Kondisi V yaitu 295.5 [A] (Lihat TABEL V)

Pada $t = 2$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I yaitu 70.5 [A], Kondisi II yaitu 60.9 [A], Kondisi III yaitu 67.9 [A], Kondisi IV yaitu 60.9 [A], Kondisi V yaitu 64.1 [A]

Perhatikan TABEL V

Pada $t = 4$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I yaitu 68.5[A], Kondisi II yaitu 88.1 [A], Kondisi III yaitu 67.0 [A], Kondisi IV yaitu 60.9 [A], Kondisi V yaitu 64.4 [A]

TABEL IV. DATA HASIL PENGUKURAN ARUS (T = 0-1 S & T = 2 S)

FASA	ARUS									
	$I_{VL=0-1} [A]$					$I_{VL=2} [A]$				
	no C	$Q_C [kVAr]$				no C	$Q_C [kVAr]$			
	70	50	20	10		70	50	20	10	
R ₁	266,0	215,0	291,0	276,2	295,5	70,5	60,9	67,9	60,9	64,1
R ₂	298,0	248,4	296,3	273,4	283,0	72,6	61,3	66,7	60,6	64,9
R ₃	272,0	266,8	293,9	269,6	231,7	66,8	70,3	67,9	61,3	78,7
S ₁	285,0	264,4	297,0	281,3	292,4	69,6	62,1	81,5	63,4	65,4
S ₂	262,2	219,8	297,0	276,7	292,1	69,1	61,7	69,6	62,7	65,0
S ₃	275,6	251,6	299,8	275,9	284,6	76,6	61,7	70,0	62,7	66,0
T ₁	271,6	260,1	299,9	276,2	284,4	67,0	60,3	65,4	61,0	62,3
T ₂	270,0	263,0	293,7	274,6	287,4	66,3	59,0	65,7	61,0	62,8
T ₃	275,4	244,8	290,7	271,6	284,2	67,2	60,4	65,9	60,6	61,7

TABEL V DATA HASIL PENGUKURAN ARUS (T = 4 S & T = 6 S)

FASA	ARUS									
	$I_{VL=0} [A]$					$I_{Switch(t=6)} [A]$				
	no C	$Q_C [kVAr]$				no C	$Q_C [kVAr]$			
	70	50	20	10		70	50	20	10	
R ₁	68,5	88,1	67,0	60,9	64,4	142,8	165,0	156,1	184,7	158,0
R ₂	68,0	61,4	67,6	60,4	64,1	168,0	150,3	142,7	149,4	168,0
R ₃	67,4	60,6	66,9	60,5	63,3	173,0	150,8	133,8	169,8	183,5
S ₁	68,8	62,0	69,1	62,7	66,2	176,2	147,0	112,2	153,4	161,4
S ₂	68,9	63,0	69,4	62,7	65,0	187,6	134,0	146,8	127,6	167,6
S ₃	68,7	62,1	68,8	62,6	64,8	160,4	139,2	142,0	137,5	155,3
T ₁	66,1	84,8	65,2	60,2	62,1	179,7	171,4	179,9	174,2	189,6
T ₂	66,2	60,1	65,5	60,1	61,5	189,3	133,3	179,3	179,3	177,5
T ₃	66,1	78,6	65,7	60,4	61,6	119,5	159,0	141,6	157,4	186,4

Pada $t = 6$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I (yaitu 142.8 [A], Kondisi II yaitu 165.0 [A], Kondisi III yaitu 156.1 [A], Kondisi IV yaitu 184.7 [A], Kondisi V yaitu 158.0 [A]

Perhatikan TABEL VI

Pada $t = 8$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I yaitu 82.6 [A], Kondisi II yaitu 82.8 [A], Kondisi III yaitu 73.1 [A], Kondisi IV yaitu 70.9 [A], Kondisi V yaitu 77.3 [A]

Pada $t = 12$ s, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut :

Kondisi I yaitu 83.4 [A], Kondisi II yaitu 82.5 [A], Kondisi III yaitu 73.9 [A], Kondisi IV yaitu 71.9 [A], Kondisi V yaitu 78.0 [A]

TABEL VI. DATA HASIL PENGUKURAN ARUS (T = 8 S & T = 12 S)

FASA	ARUS									
	$I_{VL=8} [A]$					$I_{VL=12} [A]$				
	no C	$Q_C [kVAr]$				no C	$Q_C [kVAr]$			
	70	50	20	10		70	50	20	10	
R ₁	82,6	82,8	73,1	70,9	77,3	83,8	82,5	73,9	71,9	78,0
R ₂	82,3	82,5	72,5	70,9	76,4	83,5	82,7	73,3	71,7	76,8
R ₃	83,1	81,6	73,1	71,5	75,3	83,0	82,3	74,0	72,3	76,3
S ₁	81,0	61,7	57,4	70,9	75,9	81,9	62,4	58,3	72,2	76,9
S ₂	80,7	61,4	57,4	70,5	75,2	81,7	62,3	58,0	71,5	76,2
S ₃	80,1	61,6	57,9	71,1	75,1	81,4	62,2	58,6	72,2	75,9
T ₁	76,6	75,9	72,9	65,6	70,8	77,7	76,3	73,8	66,7	70,9
T ₂	76,8	75,8	72,8	65,7	69,7	77,4	76,6	73,5	66,6	70,6
T ₃	76,5	75,7	72,6	65,7	69,9	77,3	76,1	73,5	66,7	70,9

TABEL VII. HASIL PERHITUNGAN ARUS RATA-RATA FASA R

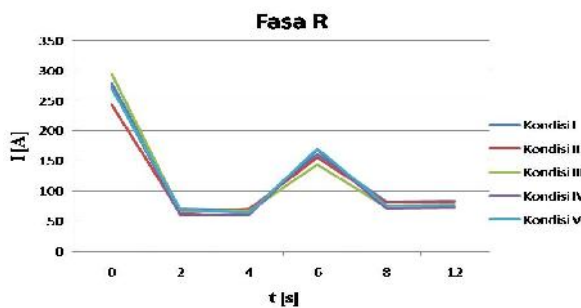
t [s]	I [A]				
	Kondisi I	Kondisi II	Kondisi III	Kondisi IV	Kondisi V
0-1	278,66	243,4	293,73	273,06	270,06
2	69,96	64,16	67,5	61,03	69,23
4	67,96	70,03	67,16	60,6	63,93
6	161,26	155,36	144,2	167,9	169,83
8	82,66	82,3	72,9	71,1	76,33
12	83,43	82,5	73,73	71,96	77,03

TABEL VIII. HASIL PERHITUNGAN ARUS RATA-RATA FASA S

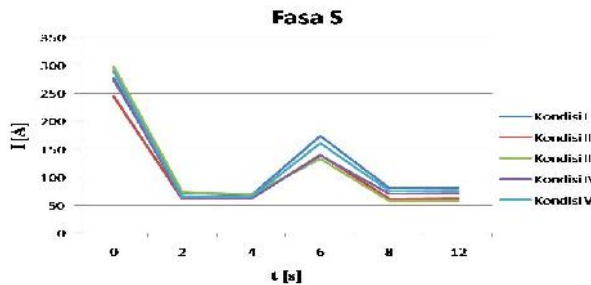
t [s]	I [A]				
	Kondisi I	Kondisi II	Kondisi III	Kondisi IV	Kondisi V
0-1	274,26	245,26	297,93	277,96	289,7
2	71,76	61,83	73,7	62,93	65,46
4	68,8	62,36	69,1	62,66	65,33
6	174,73	140,06	133,66	139,5	161,43
8	80,6	61,56	57,56	70,83	75,4
12	81,66	62,3	58,3	71,96	76,33

TABEL IX HASIL PERHITUNGAN ARUS RATA-RATA PADA FASA T

t [s]	I [A]				
	Kondisi I	Kondisi II	Kondisi III	Kondisi IV	Kondisi V
0	272,33	255,96	294,76	274,13	285,33
2	66,83	59,9	65,66	60,86	62,26
4	66,13	74,5	65,46	60,23	61,73
6	162,83	154,56	166,93	170,3	184,5
8	76,63	75,8	72,76	65,66	70,13
12	77,46	76,33	73,6	66,66	70,8



Gambar 13. Grafik Arus Motor Induksi Fasa R



Gambar 14. Grafik Arus Motor Induksi Fasa S

Arus rata-rata Fasa R (Lihat TABEL VII dan Gambar 13).

Pada saat pengasutan (0 sampai detik ke 1), posisi Y :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 293.73 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi II (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 70$ [kVAR]) yaitu 243.4 [A].

Pada saat switching (detik ke 6) :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi V (pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor) yaitu 169.83 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 144.2 [A].

Pada saat running (detik ke 12), posisi Δ :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi I (pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor) yaitu 83.43 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi IV (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 71.96 [A].

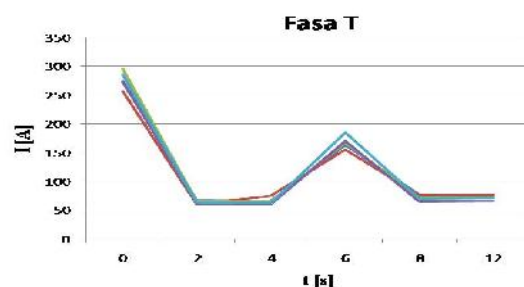
Gambar 12 menunjukkan besar arus fasa R berdasarkan fungsi waktu. Grafik ini berupa kurva patahan, karena pengambilan data hanya dilakukan pada detik 0-1, detik ke 2, detik ke 4, detik ke 6, detik ke 8, dan detik ke 12. Terlihat bahwa saat pengasutan arus yang dihasilkan adalah sangat besar. Kemudian arusnya berkurang dan naik lagi pada saat peralihan dari posisi Y ke Δ , tapi besarnya arus kurang dari arus pengasutan. Setelah proses peralihan, besar arus berkurang.

Arus rata-rata Fasa S (Lihat TABEL VIII dan Gambar 14).

Pada saat pengasutan (0 sampai detik ke 1), posisi Y :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 297.93 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi II (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 70$ [kVAR]) yaitu 245.26 [A].



Gambar 15. Grafik Arus Motor Induksi Fasa T

Pada saat switching (detik ke 6):

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi I (pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor) yaitu 174.73 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 133.66 [A].

Pada saat running (detik ke 12), posisi Δ :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi I (pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor) yaitu 88.66 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 58.3 [A].

Gambar 13 ini menunjukkan besar arus fasa R berdasarkan fungsi waktu. Grafik ini berupa kurva patahan, karena pengambilan data hanya dilakukan pada detik 0-1, detik ke 2, detik ke 4, detik ke 6, detik ke 8, dan detik ke 12. Terlihat bahwa saat pengasutan arus yang dihasilkan adalah sangat besar. Kemudian arusnya berkurang dan naik lagi pada saat peralihan dari posisi Y ke Δ , tapi besarnya arus kurang dari arus pengasutan. Setelah proses peralihan, besar arus berkurang.

Arus rata-rata Fasa T (Lihat TABEL IX dan Gambar 15).

Pada saat pengasutan (0 sampai detik ke 1), posisi Y :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi III (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 50$ [kVAR]) yaitu 294.76 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi II (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 70$ [kVAR]) yaitu 255.96 [A].

Pada saat switching (detik ke 6):

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi V (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 10$ [kVAR]) yaitu 184.5 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi II (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 70$ [kVAR]) yaitu 154.56 [A].

Pada saat running (detik ke 12), posisi Δ :

Arus yang paling besar dihasilkan pada kondisi I (pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor) yaitu 77.46 [A].

Arus yang paling kecil dihasilkan pada kondisi IV (pengasutan Y- Δ infuse capacitor, $Q_C = 20$ [kVAR]) yaitu 66.66 [A].

Gambar 14 menunjukkan besar arus fasa R berdasarkan fungsi waktu. Grafik ini berupa kurva patahan, karena pengambilan data hanya dilakukan pada detik 0-1, detik ke 2, detik ke 4, detik ke 6, detik ke 8, dan detik ke 12. Terlihat bahwa saat pengasutan arus yang dihasilkan adalah sangat besar. Kemudian arusnya berkurang dan naik lagi pada saat

peralihan dari posisi Y ke Δ, tapi besarnya arus kurang dari arus pengasutan. Setelah proses peralihan, besar arus berkurang.

Evaluasi Tegangan

Gambar 16 merupakan grafik tegangan dari data yang ada di TABEL X. Grafik ini menunjukkan tegangan fasa-fasa pada keempat kondisi. Tegangan fasa-fasa yang lebih seimbang (terdapat perbedaan kecil nilai tegangan antara V_{RS} , V_{RT} , dan V_{ST}) berada pada Kondisi IV (pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 20$ [kVAr]). Tegangan fasa-fasa yang kurang seimbang (terdapat perbedaan besar nilai tegangan antara V_{RS} , V_{RT} , dan V_{ST}) berada pada Kondisi I (pengasutan Y-Δ, Tanpa Kapasitor). Berdasarkan hasil pengukuran tersebut, memperlihatkan bahwa dengan adanya kapasitor membuat tegangan lebih stabil.

B. Hasil Perhitungan Daya Reaktif

Berikut ini akan diuraikan hasil perhitungan daya reaktif saat pengoperasian dan pengasutan motor induksi.

Running / Pengoperasian

Kondisi I ($\cos \phi_1 = 0,8$; $\cos \phi_2 = 0,9$)

Faktor daya mula-mula = 0,8

$$\cos \phi_1 = 0,8 \text{ maka } \phi_1 = 36,87^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap oleh motor adalah

$$\begin{aligned} Q_{C1} &= P \times \tan \phi_1 \\ &= 75000[W] \times \tan 36,87^\circ \\ &= 75000[W] \times 0,75 \\ &= 56.250[VAr] \end{aligned}$$

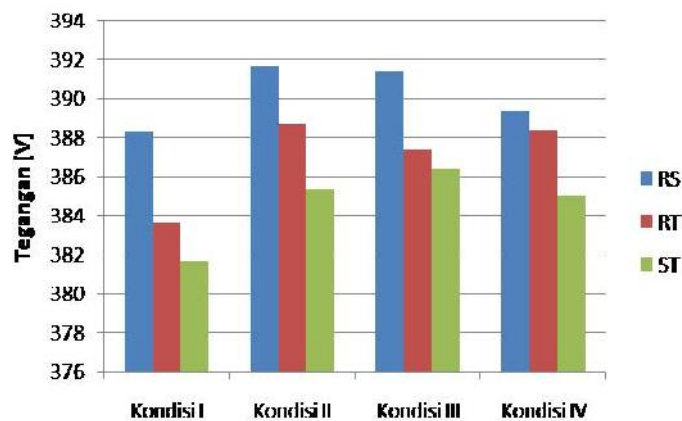
Jika Faktor Daya yang diinginkan = 0,9

$$\cos \phi_2 = 0,9 \text{ maka } \phi_2 = 25,84^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap oleh motor adalah

$$\begin{aligned} Q_{C2} &= P \times \tan \phi_2 \\ &= 75000[W] \times \tan 25,84^\circ \\ &= 75000[W] \times 0,4842 \\ &= 36.315[VAr] \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas terlihat besar konsumsi daya reaktif lebih kecil ketika faktor dayanya diperbesar menjadi 0,9. Maka besar kapasitas KVAR yang dipasang untuk memperbaiki faktor daya adalah sebagai berikut :



Gambar 16. Grafik Tegangan Antarfasa (V_{RS} , V_{RT} , dan V_{ST})

$$\begin{aligned} Q_C &= P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\ &= 75000[W] \times (\tan 36,87^\circ - \tan 25,84^\circ) \\ &= 75000[W] \times (0,75 - 0,48) \\ &= 75000[W] \times (0,27) \\ &= 19.929[VAr] \\ &= 19,929[kVAr] \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,8 menjadi 0,9 yaitu 19,929 [kVAr]. Setelah mendapat besar daya reaktif kapasitor, maka kapasitansi kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q_C}{V^2 \times 2\pi \times f} \\ &= \frac{19,929 [kVAr]}{380^2 \times 2\pi \times 50 [Hz]} \\ &= \frac{19929[kVAr]}{45.341.600} \\ &= 0,00044F \\ &= 0,44mF \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif kapasitor yang dibutuhkan pada saat motor beroperasi yaitu 19,929 [kVAr].

Kondisi II ($\cos \phi_1 = 0,8$; $\cos \phi_2 = 1$)

Faktor daya mula-mula = 0,8

$$\cos \phi_1 = 0,8 \text{ maka } \phi_1 = 36,87^\circ$$

Maka daya reaktif yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} Q_{C1} &= P \times \tan \phi_1 \\ &= 75000[W] \times \tan 36,87^\circ \\ &= 75000[W] \times 0,75 \\ &= 56.250[VAr] \end{aligned}$$

Jika Faktor Daya yang diinginkan = 1

$$\cos \phi_2 = 1 \text{ maka } \phi_2 = 0^\circ$$

Maka daya reaktif yang dihasilkan adalah

$$\begin{aligned} Q_{C2} &= P \times \tan \phi_2 \\ &= 75000[W] \times \tan 0^\circ \\ &= 75000[W] \times 0 \\ &= 0[VAr] \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas terlihat besar konsumsi daya reaktif lebih kecil ketika faktor dayanya diperbesar menjadi 0,9. Maka besar kapasitas KVAR yang dipasang untuk memperbaiki faktor daya adalah sebagai berikut :

TABEL X HASIL PEHITUNGAN TEGANGAN RATA-RATA

KONDISI	TEGANGAN [V]		
	RS	RT	ST
Kondisi I (pengasutan Y-Δ, Tanpa Kapasitor)	388,3	383,6	381,66
Kondisi II (pengasutan Y-Δ <i>infuse capacitor</i> , 70 [kVAr])	391,66	388,66	385,33
Kondisi III (pengasutan Y-Δ <i>infuse capacitor</i> , 50 [kVAr])	391,33	387,33	386,33
Kondisi IV (pengasutan Y-Δ <i>infuse capacitor</i> , 20 [kVAr])	389,33	388,33	385

$$\begin{aligned}
 Q_c &= P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\
 &= 75000 [W] \times (\tan 36,87^\circ - \tan 0^\circ) \\
 &= 75000 [W] \times (0,75 - 0) \\
 &= 75000 [W] \times (0,75) \\
 &= 56.250 [VA_r] \\
 &= 56,250 [kVA_r]
 \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,8 menjadi 0,9 yaitu 56,25 [kVA_r]. Setelah mendapat besar daya reaktif kapasitor, maka kapasitansi kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

Kapasitansi Kapasitor:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{Q_c}{V^2 \times 2\pi \times f} \\
 &= \frac{56.250 [kVA_r]}{380^2 \times 2\pi \times 50 [Hz]} \\
 &= \frac{56,250 [kVA_r]}{45.341.600} \\
 &= 0,0012 F \\
 &= 1,2 mF
 \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif kapasitor yang dibutuhkan pada saat motor beroperasi yaitu 56,250 [kVA_r].

Pengasutan (Starting)

Metode pengasutan motor induksi menggunakan pengasutan Y-Δ *infuse capacitor*. Berikut ini merupakan perhitungan arus nominal (I_N), persamaan 2.8.

$$\begin{aligned}
 I_N &= \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \phi} \\
 &= \frac{75000 [W]}{\sqrt{3} \times 380 [V] \times 0,8} \\
 &= \frac{75.000 [W]}{526,54} \\
 &= 142,43 [A]
 \end{aligned}$$

Berdasarkan data yang ada, besar arus pada saat beban penuh adalah sebesar 142,43 [A]. Pada pengasutan Y-Δ, arus asut besarnya 3 sampai 4 kali arus nominal.

Jadi besarnya arus asut adalah berkisar antara 427,29 [A] sampai 569,72 [A] (Lihat TABEL XI). Sehingga berdasarkan perhitungan, maka arus asut rata-rata saat motor pertama kali dioperasikan adalah 498,505 [A]. Besarnya arus asut ini berpengaruh pada daya motor. Perhitungan daya motor ini menggunakan besar arus asut (I_s) 498,505 [A]

Perhitungan Daya (P):

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \times V \times I_s \times \cos \phi \\
 &= \sqrt{3} \times 380 [V] \times 498,505 [A] \times 0,8 \\
 &= 262484,54 [W] \\
 &= 262,484 [kW]
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan yang ada maka daya motor pada saat pengasutan sebesar 262,484 [kW]. Setelah mendapatkan besar daya motor saat pengasutan, maka dilanjutkan perhitungan dalam menentukan kapasitas daya reaktif.

TABEL XI. ARUS ASUT (I_s)

3 kali	4 kali
I _s = 3 × 142,43 [A] = 427,29 [A]	I _s = 4 × 142,43 [A] = 569,72 [A]

Kondisi I (cos φ₁ = 0,8; cos φ₂ = 0,9)

Faktor daya mula-mula = 0,8

$$\cos \phi_1 = 0,8 \quad \phi_1 = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap motor adalah

$$\begin{aligned}
 Q_{c1} &= P \times \tan \phi_1 \\
 &= 262484,54 [W] \times \tan 36,87^\circ \\
 &= 262484,54 [W] \times 0,75 \\
 &= 196.863 [VA_r]
 \end{aligned}$$

Jika Faktor Daya yang diinginkan = 0,9

$$\cos \phi_2 = 0,9$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} 0,9 = 25,84^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap motor adalah

$$\begin{aligned}
 Q_{c2} &= P \times \tan \phi_2 \\
 &= 262484,54 [W] \times \tan 25,84^\circ \\
 &= 262484,54 [W] \times 0,4842 \\
 &= 127094,75 [VA_r]
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas terlihat besar konsumsi daya reaktif lebih kecil ketika faktor dayanya diperbesar menjadi 0,9. Maka besar kapasitas KVA_r yang dipasang untuk memperbaiki faktor daya adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_c &= P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \\
 &= 262.484,54 [W] \times (\tan 36,87^\circ - \tan 25,84^\circ) \\
 &= 262484,54 [W] \times (0,75 - 0,48) \\
 &= 262484,54 [W] \times (0,27) \\
 &= 70870,82 [VA_r] \\
 &= 70,87 [kVA_r]
 \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,8 menjadi 0,9 yaitu 70,87 [kVA_r]. Setelah mendapat besar daya reaktif kapasitor, maka kapasitansi kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

Kapasitansi Kapasitor:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{Q_c}{V^2 \times 2\pi \times f} \\
 &= \frac{70.870,82 [VA_r]}{380^2 \times 2\pi \times 50 [Hz]} \\
 &= \frac{70.870,82 [VA_r]}{45.341.600} \\
 &= 0,0015 F \\
 &= 1,5 mF
 \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif kapasitor yang dibutuhkan pada saat pengasutan yaitu 70,87 [kVA_r].

Kondisi II (cos φ₁ = 0,8; cos φ₂ = 1)

Faktor daya mula-mula = 0,8

$$\cos \phi_1 = 0,8 \quad \phi_1 = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap motor adalah

$$\begin{aligned}
 Q_{c1} &= P \times \tan \phi_1 \\
 &= 262484,54 [W] \times \tan 36,87^\circ \\
 &= 262484,54 [W] \times 0,75 \\
 &= 196.863 [VA_r]
 \end{aligned}$$

Jika Faktor Daya yang diinginkan = 1

$$\cos\varphi_2 = 1$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1} 1 = 0^\circ$$

Maka daya reaktif yang diserap motor adalah

$$\begin{aligned} Q_{C2} &= P \times \tan \varphi_2 \\ &= 262484,54 [W] \times \tan 0^\circ \\ &= 262484,54 [W] \times 0 \\ &= 0 [VAr] \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas terlihat besar konsumsi daya reaktif lebih kecil ketika faktor dayanya diperbesar menjadi 0,9. Maka besar kapasitas KVAR yang dipasang untuk memperbaiki faktor daya adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_c &= P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \\ &= 262484,54 [W] \times (\tan 36,87^\circ - \tan 0^\circ) \\ &= 262484,54 [W] \times (0,75 - 0) \\ &= 262484,54 [W] \times (0,75) \\ &= 196863,4 [VAr] \\ &= 196,86 [kVAr] \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,8 menjadi 0,9 yaitu 196,86 [kVAr]. Setelah mendapat besar daya reaktif kapasitor, maka kapasitansi kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

Kapasitansi Kapasitor:

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q_c}{V^2 \times 2\pi \times f} \\ &= \frac{196.863,4 [VAr]}{380^2 \times 2\pi \times 50 [Hz]} \\ &= \frac{196.863,4 [kVAr]}{45.341.600} \\ &= 0,0043F \\ &= 4,3 mF \end{aligned}$$

Jadi daya reaktif kapasitor yang dibutuhkan pada saat pengasutan motor yaitu 196,86 [kVAr].

Perhitungan Biaya Kelistrikan

Berikut ini akan diuraikan mengenai biaya kelistrikan sebelum dan sesudah kompensasi perbaikan faktor daya

Perhitungan Pemakaian Sebelum Kompensasi

$$P = 75 [kW] = 75.000 [W], \cos\varphi = 0,8 \text{ maka } \varphi = 36,87^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian per bulan (30 hari)} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 75 [kW] \\ &= 40500 [kWh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Batas } kVAr \text{ yang dibebaskan PLN} &= 0,62 \times 40500 \\ &= 25110 [kVAr] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya Reaktif Terpakai (Q)} &= P [W] \times \tan \varphi \\ &= 75000 [W] \times \tan 36,87^\circ \\ &= 56250 [VAr] \\ &= 56 [kVAr] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian Daya Reaktif per bulan} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 56,25 [kVAr] \\ &= 30375 [kVArh] \end{aligned}$$

Karena daya reaktif perbulan lebih besar dari batas daya reaktif yang dibebaskan PLN, maka perusahaan dikenai denda.

$$\begin{aligned} \text{Biaya Denda} &= (30375 - 25110) kVArh \times Rp 1013 / kVArh \\ &= (5265) \times Rp 1013 \\ &= Rp 5333445 \end{aligned}$$

Perhitungan Pemakaian Sesudah Kompensasi

Kondisi I ($\cos \varphi = 0,9$)

$$P = 75 [kW] = 75.000 [W], \cos \varphi = 0,9, \text{ maka } \varphi = 25,84^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian per bulan (30 hari)} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 75 [kW] \\ &= 40500 [kWh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Batas } kVAr \text{ yang dibebaskan PLN} &= 0,62 \times 40500 \\ &= 25.110 [kVArh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya Reaktif Terpakai (Q)} &= P [W] \times \tan \varphi \\ &= 75.000 [W] \times \tan 25,84^\circ \\ &= 36.000 [VAr] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian Daya Reaktif per bulan} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 36 [kVArh] \\ &= 19440 [kVArh] \end{aligned}$$

Karena daya reaktif perbulan kurang dari batas daya reaktif yang dibebaskan PLN, maka perusahaan tidak dikenai denda.

Kondisi II ($\cos \varphi = 1$)

$$P = 75 [kW] = 75.000 [W]$$

$$\cos \varphi = 1, \text{ maka } \varphi = 0^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian per bulan (30 hari)} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 75 [kW] \\ &= 40.500 [kWh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Batas } kVAr \text{ yang dibebaskan PLN} &= 0,62 \times 40500 \\ &= 25110 [kVArh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya Reaktif Terpakai (Q)} &= P [W] \times \tan \varphi \\ &= 75.000 [W] \times \tan 0^\circ \\ &= 0 [VAr] \\ &= 0 [kVArh] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian Daya Reaktif per bulan} &= 18 [jam/hari] \times 30 [hari] \times 0 [kVArh] \\ &= 0 [kVArh] \end{aligned}$$

Karena daya reaktif perbulan kurang dari batas daya reaktif yang dibebaskan PLN, maka perusahaan tidak dikenai denda.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Penambahan kapasitor pada rangkaian pengasutan Y- Δ memberikan pengaruh terhadap pengurangan arus asut dan penstabil tegangan pada motor induksi. Berdasarkan data yang ada di TABEL (VII, VIII, IX) dan Gambar (13, 14, 15) terlihat pengaruh penambahan kapasitor, dimana arus asut pada pengasutan Y- Δ *infuse capacitor* 70 [kVAr] lebih kecil dibandingkan dengan arus asut pada pengasutan Y- Δ tanpa kapasitor (lihat TABEL XII). Tegangan fasa-fasa yang lebih seimbang (terdapat perbedaan kecil nilai tegangan antara V_{RS} , V_{RT} , dan V_{ST}) berada pada Kondisi IV (pengasutan Y- Δ *infuse capacitor*, $Q_C = 20$ [kVAr]). Tegangan fasa-fasa yang kurang seimbang (terdapat perbedaan besar nilai tegangan antara V_{RS} , V_{RT} , dan V_{ST}) berada pada Kondisi I (pengasutan Y- Δ , Tanpa Kapasitor). Berdasarkan hasil pengukuran tersebut, memperlihatkan bahwa dengan adanya kapasitor membuat tegangan lebih stabil.

TABEL XII PERBANDINGAN ARUS ASUT

Kondisi	Arus Asut [A]		
	I_R	I_S	I_T
Kondisi I (pengasutan Y- Δ , Tanpa Kapasitor)	278	274.26	272.33
Kondisi II (pengasutan Y- Δ <i>infuse capacitor</i> , 70 [kVAr])	243.4	245.26	255.96
Kondisi III (pengasutan Y- Δ <i>infuse capacitor</i> , 50 [kVAr])	293.73	297.93	294.76
Kondisi IV (pengasutan Y- Δ <i>infuse capacitor</i> , 20 [kVAr])	273.06	277.96	274.13
Kondisi V (pengasutan Y- Δ <i>infuse capacitor</i> , 10 [kVAr])	270.06	289.7	285.33

B. Saran

Pada saat pengukuran harus menggunakan alat ukur yang lebih teliti dan lebih banyak jumlahnya. Pengasutan Y- Δ *infuse capacitor* ini dapat dikembangkan lagi sehingga menghasilkan metode pengasutan yang lebih efektif dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1.] A. Pudjanarsa, Djati Nursuhud, "Mesin Konversi Energi", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2008.
- [2.] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Mesin-mesin Listrik, Edisi Keempat". Penerbit Erlangga, Jakarta, 1986.
- [3.] A.F. Nelwan, "Bahan Ajar : Teknik Tenaga Listrik", Universitas Sam Ratulangi, Manado, 2007.
- [4.] A.S. Pabla, Ir. A. Hadi, "Sistem Distribusi Daya Listrik", Penerbit Erlangga, Jakarta, 1994.
- [5.] B.L. Theraja & A.K. Theraja, "Electrical Technology", S. Chand & Company Ltd, New Delhi, 1999
- [6.] E. C. Lister, "Mesin dan Rangkaian Listrik, edisi Keenam", Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993.
- [7.] P. Sumardjati, Sofian Yahya, Ali Mashar, "Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik, Jilid 3", Departemen Pendidikan Nasional, 2008
- [8.] S.J. Chapman, "Machinery Fundamentals, 2nd Ed.", McGraw-Hill International Edition, New York, 1991.
- [9.] S. Sudirham, "Analisis Rangkaian Listrik", Penerbit ITB, Bandung, 2002.
- [10.] Siswoyo, Teknik Listrik Industri, Jilid 2, Departemen Pendidikan Nasional, 2008
- [11.] Tim Penyusun, "Softstarter Handbook", ABB, 2003.
- [12.] Zuhul, "Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya", PT. Gramedia Pustaka, Jakarta, 1995.