

Evaluasi Jaringan Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Cokro Tulung Kabupaten Klaten

Maimun¹⁾, Suharyanto²⁾, M. Isnaeni BS³⁾

^{1,2,3)} Jurusan Teknik Elektro FT UGM
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA
E-mail: mmn_pnl@gmail.com

ABSTRAK

Evaluasi yang dilakukan pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung bertujuan untuk mengetahui karakteristik jaringan listrik tersebut, khususnya rugi-rugi daya, drop tegangan dan faktor daya sistem. Proses evaluasi dilakukan dengan membuat studi aliran daya pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung dengan bantuan program ETAP 7.0. Studi aliran daya pada jaringan listrik tersebut dilakukan pada saat beban penuh kondisi tidak standar (tegangan sistem 230/400 V) dan kondisi standar (tegangan sistem 220/380 V).

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa rugi-rugi daya total (ΔP_T) yang timbul pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung saat beban penuh sebesar 241,768 W atau 0,673 % dari daya total keseluruhan (37,54 kW) pada kondisi tidak standar dan 268,442 W atau 0,715 % dari daya total keseluruhan (37,58 kW) pada kondisi standar. Drop tegangan yang timbul pada Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) sebesar 1,07 V atau 0,268 % dari tegangan kerja atau tegangan nominalnya (400 V) pada kondisi tidak standar dan 1,123 V atau 0,295 % dari tegangan nominalnya (380 V) pada kondisi standar.

Drop tegangan yang timbul pada Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) masing-masing sebesar 6,198 V atau 2,683 % dari tegangan nominalnya (230 V) pada kondisi tidak standar dan 6,994 V atau 3,193 % dari tegangan nominalnya (220 V) pada kondisi standar. Perbaikan faktor daya sampai dengan 90 % yang dilakukan pada jaringan listrik SKTR PLTMh Cokro Tulung dapat mengurangi rugi-rugi daya aktif total (ΔP_T) sebesar 12,017 % dan juga dapat mengurangi kebutuhan daya reaktif (Q) dan daya semu (S) masing-masing sebesar 35,66 % dan 11,27 %.

Selain analisis aliran daya, juga dilakukan analisis-analisis lainnya. Dari hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa tegangan dan frekuensi sistem yang sedang beroperasi sekarang ini tidak standar dan kemampuan PLTMh Cokro Tulung sudah maksimal, dimana daya yang disalurkan beban-beban sudah mencapai 37,6 kW atau 80 % dari kapasitas terpasang 47,34 kW dengan efisiensi 79,8 % (motor induksi dioperasikan sebagai generator). Hasil analisis akan dijadikan data rujukan (rekomendasi) untuk perbaikan, sehingga jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung dapat beroperasi dengan baik dan sesuai dengan standar yang berlaku di Indonesia (PUIL 2000).

Kata kunci: PLTMh, Program ETAP, Jaringan listrik, Studi aliran daya

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi, baik di Indonesia khususnya maupun di dunia pada umumnya, terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, pertumbuhan

ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri yang cenderung terus meningkat. Sedangkan sumber energi utama yang berasal dari energi fosil, ketersediaannya sangat terbatas dan terus mengalami

penyusutan atau menipis. Usaha-usaha untuk mencari sumber energi alternatif sebagai pengganti energi fosil terus diupayakan oleh para peneliti di berbagai Negara. Energi alternatif sebagai pengganti energi fosil disebut dengan istilah energi terbarukan. Energi terbarukan dapat didefinisikan sebagai energi yang secara cepat dapat diproduksi kembali melalui proses alam. Energi terbarukan meliputi energi air, panas bumi, matahari, angin, biogas, biomassa, gelombang laut dan lain sebagainya. Salah satu energi terbarukan yang paling banyak terdapat di Indonesia adalah energi air. Energi potensial air (pada air terjun) dan energi kinetik air (pada air yang mengalir) dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik melalui proses konversi energi.

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) merupakan salah satu sistem konversi energi potensial dan energi kinetik air menjadi energi listrik berskala kecil (mikro). Potensi sumber air untuk PLTMh cukup banyak terdapat di Indonesia. Salah satu sumber mata air yang cocok dibangun PLTMh adalah sumber mata air yang berasal dari pegunungan Brunyah di desa Cokro, Kecamatan Tulung, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah. Untuk memenuhi kebutuhan listrik di desa Cokro Tulung sejak dahulu telah digunakan

PLTMh. Walaupun pada awalnya di desa Cokro Tulung telah dibangun PLTMh dengan menggunakan kincir air, tegangan sistem 110 Volt pada masa itu (Tahun 1980). Namun baru pada tahun 2006, dengan adanya proyek Pemerintah Kabupaten Klaten dalam Pekerjaan Pendampingan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (P3PLTMh) melalui APBD Kabupaten Klaten, maka dibangunlah PLTMh Cokro Tulung dengan menggunakan turbin air moderen (*turbin propeller open flume*).

Pada kondisi saat ini PLTMh Cokro Tulung beroperasi selama 24 jam dalam sehari, kecuali kalau ada perbaikan, dengan menggunakan dua unit generator induksi berkapasitas masing-masing 30 kW dengan tegangan sistem 230/400 V. PLTMh Cokro Tulung merupakan pembangkit listrik yang beroperasi sendiri (*stand alone*) atau *off grid*. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTMh Cokro Tulung dipergunakan untuk keperluan wisata air (*water boom*) Umbul Ingas dan empat buah rumah yang berada di lokasi wisata air tersebut. Energi adalah daya kali waktu. Daya listrik tersebut disalurkan ke beban-beban yang ada pada wisata air *water boom* dan empat buah rumah yang ada di area wisata air tersebut, melalui jaringan listrik tegangan rendah, baik Saluran Udara Tegangan Rendah

(SUTR) maupun Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR). Dalam pendistribusian daya listrik dari pembangkit (PLTMh) ke pusat beban melalui jaringan listrik, daya listrik tersebut mengalami susut atau rugi-rugi sehingga efisiensi jaringan listrik akan menurun. Jaringan listrik yang sudah lama dioperasikan perlu di evaluasi kembali untuk meningkatkan keandalannya agar dapat beroperasi dengan baik.

TINJUAN PUSTAKA

1 Pembangkit Listrik Tenaga

Mikrohidro (PLTMh)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) merupakan pembangkit listrik tenaga air yang menghasilkan ke luaran daya listrik kecil. Berdasarkan istilah bahasa mikro artinya kecil sedangkan hidro artinya air. Jadi mikrohidro adalah pembangkit listrik tenaga air berskala kecil. Dalam prakteknya istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun bisa dipastikan bahwa mikrohidro, akan menggunakan air sebagai sumber energinya. Yang membedakan antara istilah mikrohidro dengan minihidro adalah *out-put* daya yang dihasilkan. Mikrohidro menghasilkan daya lebih rendah dari 100 kW, sedangkan untuk minihidro daya ke luarannya berkisar antara 100 kW sampai 1 MW.

1.1 Prinsip Kerja PLTMh

Pada prinsipnya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) memanfaatkan beda ketinggian jatuh air dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Secara teknis, mikrohidro memiliki tiga komponen utama yaitu air (sumber energi), turbin dan generator. Air yang mengalir dengan kapasitas dan ketinggian tertentu dialirkan menuju turbin yang terdapat pada rumah pembangkit (*power house*). Dirumah pembangkit air tersebut akan menumbuk susdu-sudu turbin, dimana turbin itu sendiri dipastikan akan menerima energi potensial air tersebut dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Poros turbin yang berputar ditransmisikan atau dikopel ke generator dengan menggunakan kopling. Kopling tersebut akan menghubungkan poros turbin dengan poros rotor dari generator. Dengan berputarnya poros turbin maka akan ikut berputar poros generator sehingga akan menghasilkan energi listrik. Persamaan umum yang dipakai untuk menghitung daya ke luaran bersih (daya real) dari sistem PLTA/PLTMh adalah:

$$P_{net} = g \times Q \times H_e \times \eta_T \quad (1)$$

dengan:

P_{net} = daya bersih sistem atau daya total sistem (kW)

g = gaya grafitasi bumi (9,8 m/detik²)

H_e = tinggi jatuh air (*head*) efektif (m)

Q = debit air (m^3/detik).

η_T = efisiensi total sistem.

1.2 Komponen-Komponen PLTMh

Untuk memanfaatkan energi potensial air dengan tepat sehingga menghasilkan energi listrik yang baik, suatu PLTMh secara teknis terdiri dari tiga komponen utama yaitu air sebagai sumber energi, turbin dan generator serta dilengkapi dengan komponen-komponen pendukungnya. Secara garis besar komponen-komponen PLTMh dapat dibagi kepada dua bagian, yaitu:

- (a). Komponen-Komponen Sipil.
- (b). Komponen-Komponen Mekanikal dan Elektrikal.

a. Komponen-Komponen Sipil

Komponen-komponen sipil yang diperlukan untuk membangun suatu sistem PLTMh tergantung dimana PLTMh tersebut akan dibangun karena bentuk dan jumlah komponen yang dibutuhkan pada suatu sistem PLTMh berbeda-beda tergantung kebutuhan dan letak geografis tempat PLTMh tersebut akan dibangun. Komponen-komponen sipil PLTMh yang dibangun pada aliran sungai terdiri dari:

1. Bendung Pengalihan (*Diversion Weir*)
2. Saluran Pemasukan (*Intake*)
3. Bak Pengendap (*Sand Trap*)

4. Saluran Pembawa (*Headrace Channel*)
5. Saluran Pelimpah (*Spillway*)
6. Bak Penenang (*forebay*)
7. Saringan (*filter*)
8. Pipa Pesat (*Penstock*)
9. Rumah Pembangkit (*Power House*)
10. Saluran Pembuang (*Tailrace Channel*)
11. Jaringan listrik (*Electrical Line*)

b. Komponen-Komponen Mekanikal dan Elektrikal

Komponen mekanikal dan elektrikal merupakan komponen yang sangat penting pada suatu sistem PLTMh karena komponen-komponen tersebut yang dipergunakan untuk merubah energi potensial air menjadi energi listrik. Komponen-komponen mekanikal dan elektrikal pada sebuah sistem PLTMh terdiri dari:

1. Turbin Air
2. Generator
3. Panel Listrik dan Alat Kontrol
4. Beban Penyeimbang (*Ballast Load*)

2. Jaringan Listrik Tegangan Rendah (JTR) PLTMh

Untuk menyalurkan daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit ke beban-beban atau pelanggan, biasanya PLTMh yang bersekala kecil, (letak beban dekat dengan pembangkit) menggunakan Jaringan

Tegangan Rendah (JTR) dengan sistem tiga fasa-empat kawat atau satu fasa-dua kawat. Berdasarkan konstruksi JTR PLTMh terdiri dari dua macam, yaitu: Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) dan Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR).

2.1 Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) PLTMh

Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) merupakan jaringan atau saluran listrik tegangan rendah bawah tanah, dimana penghantarnya ditanam didalam tanah. SKTR biasanya dipakai untuk daerah yang tidak dapat memakai saluran udara, sebagai jaringan distribusi tegangan rendah pada daerah tertentu atau sesuai permintaan pelanggan (perumahan real estate dan daerah komersil khusus) dan sebagai jaringan listrik tegangan rendah untuk industri terutama untuk keperluan instalasi motor-motor listrik. SKTR menggunakan sistem tiga fasa-empat kawat dengan tegangan 220/380 V atau sistem satu fasa-dua kawat dengan tegangan 220V. Jenis penghantar untuk SKTR adalah kabel tanah, yaitu jenis penghantar dengan pelindung metal, berisolasi *PVC* dan berinti tembaga atau alumunium, misalnya jenis NYFGbY dengan luas penampang 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm², 70 mm² dan 95 mm². Pelindung metal (*metal shield*) dipergunakan sebagai penghantar

pembumian. Penghantar jenis NYY dapat juga dipakai dengan persyaratan, bila ditanam didalam tanah penghantar tersebut harus dimasukkan dalam pipa pelindung sebagai penahan tekanan mekanis dan ditanam sedalam lebih kurang 60 cm. Luas penampang penghantar jenis NYY yang sering dipergunakan adalah 2,5 mm², 6 mm², 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm² dan 70 mm².

2.2 Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) PLTMh

Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) merupakan jaringan listrik tegangan rendah dengan menggunakan penghantar saluran udara yang dibentangkan pada tiang-tiang penyangga. SUTR biasanya dipergunakan untuk menyalurkan daya listrik dari pembangkit ke beban-beban tegangan rendah atau pelanggan tegangan rendah, daerah yang tidak bisa dipasang SKTR (misalnya menyeberangi sungai) dan sebagai SUTR pembangkit listrik berskala kecil, tegangan rendah, (misalnya PLTMh). SUTR menggunakan sistem tiga fasa-empat kawat dengan tegangan 380/220 Volt atau sistem satu fasa-dua kawat dengan tegangan 220 Volt. Jenis penghantar untuk SUTR adalah kabel udara tegangan rendah atau *Low Voltage Twisted Cable (LVTC)* jenis penghantar pilin berisolasi atau *Twisted*

Isolated Cable (TIC), misalnya jenis NFA2X, berisolasi PVC dan berinti alumunium, dengan luas penampang 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm² dan 70 mm².

2.3 Jatuh Tegangan (*Voltage Drop*), Rugi-Rugi Daya dan Perbaikan Faktor pada JTR PLTMh

Jatuh tegangan atau drop tegangan (*voltage drop*) yang diizinkan pada jaringan listrik menurut Standar Perusahaan Listrik Nasional (SPLN 72 : 1987) mengenai spesifikasi desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR) adalah sebagai berikut:

1. Jatuh atau drop tegangan pada JTR dibolehkan sampai 4% dari tegangan nominalnya (tegangan kerja) tergantung kepadatan beban.
2. Jatuh tegangan pada Sambungan Rumah (SR) dibolehkan 1 % dari tegangan nominal.
3. Drop tegangan yang diizinkan untuk sistem spindel tidak boleh melebihi 2 % dari tegangan nominalnya, sedangkan untuk sistem radial drop tegangan yang di izinkan mencapai 5 %.

Jatuh tegangan atau drop tegangan (*voltage drop*) pada jaringan listrik disebabkan oleh adanya arus (I dalam satuan Amper) yang mengalir melalui

impedansi (Z dalam satuan Ohm). Perubahan tegangan sebesar (ΔV dalam satuan Volt) diakibatkan adanya tahanan dan reaktansi dalam suatu rangkaian. Jatuh tegangan atau drop tegangan (*voltage drop*) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) atau tegangan sumber dengan tegangan diujung terima (V_t) atau tegangan pada beban dan dapat dirumuskan (Hasan Basri, 1997) sebagai berikut :

$$\Delta V \cong |V_k| - |V_t| \quad (2)$$

dengan:

ΔV = jatuh atau drop tegangan (V)

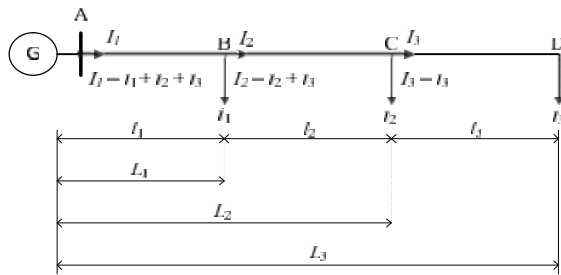
$|V_k|$ = nilai mutlak tegangan sisi kirim (V)

$|V_t|$ = nilai mutlak tegangan sisi terima (V)

a. Jatuh atau drop Tegangan pada Jaringan Listrik Tegangan Rendah PLTMh

Sistem penyaluran daya listrik PLTMh menggunakan Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dengan sistem tiga fasa-empat kawat, tegangan 220/380 V. JTR tersebut menghubungkan pembangkit sebagai sumber daya dengan beban (komsumen atau pelanggan). Beban-beban tersebar di sepanjang jaringan listrik tersebut. Pelanggan (beban) yang dilayani oleh PLTMh adalah pelanggan (beban) rumah tangga dan ada juga pelanggan

industri kecil. Untuk menganalisis jaringan listrik tegangan rendah PLTMh, maka jaringan tersebut dibuat dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) seperti terlihat pada Gambar 1 (Hasan Basri, 1997) berikut ini:



Gambar. 1 Diagram segaris JTR PLTMh

Pada Gambar 1 terlihat bahwa JTR PLTMh yang mempunyai beban-beban tersebar di sepanjang saluran dengan letak masing-masing bebannya berada pada titik B, C dan D.

Drop tegangan pada penyulang atau penghantar A–D dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$(\Delta V_{AB}) = I_1 \times l_1 (r_1 \cos \phi_A + x_1 \sin \phi_A)$$

$$(\Delta V_{BC}) = I_2 \times l_2 (r_2 \cos \phi_B + x_2 \sin \phi_B)$$

$$(\Delta V_{CD}) = I_3 \times l_3 (r_3 \cos \phi_C + x_3 \sin \phi_C)$$

Bila faktor daya dari beban-beban tersebut sama, demikian juga penghantar A-D sama, maka drop tegangan A-D dapat ditulis sebagai berikut:

$$(\Delta V_{AD}) = (r \cos \phi + x \sin \phi) \times ((I_1 \times l_1) + (I_2 \times l_2) + (I_3 \times l_3)) \quad (6)$$

atau secara umum persamaan (6) dapat ditulis menjadi:

$$(\Delta V_{tot}) = \sum_{n=1}^n (r \cos \phi + x \sin \phi) \times (I_n \times l_n) \quad (7)$$

Drop tegangan dalam persen (%), dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\left(\frac{\Delta V}{V_t} \right) \% = \frac{|V_k| - |V_t|}{V_t} \times 100 \% \quad (8)$$

atau:

$$\left(\frac{\Delta V}{V_D} \right) \% = \frac{|V_A| - |V_D|}{V_D} \times 100 \% \quad (9)$$

dengan:

V_A = tegangan sisi kirim atau tegangan sumber (V)

V_D = tegangan ujung terima atau tegangan pada beban (V)

$\Delta V_{tot} = \Delta V_{AD}$ = drop tegangan total (V)

$\Delta V_{AB} = \Delta V_{BC} = \Delta V_{CD}$ = drop tegangan pada setiap titik beban (V)

$I_1 = I_2 = I_3$ = arus pada setiap saluran (A)

$i_1 = i_2 = i_3$ = arus pada setiap beban (A)

$L_1 = L_2 = L_3$ = panjang saluran/penghantar

(m)

(4) $l_2 = l_3$ = panjang setiap

(5) saluran/penghantar (m)

$r_1 = r_2 = r_3$ = tahanan setiap penghantar ($\Omega/\text{km}/\text{fasa}$)

$x_1 = x_2 = x_3$ = reaktansi induktif setiap penghantar ($\Omega/\text{km}/\text{fasa}$).

$\phi_A = \phi_B = \phi_C$ = sudut daya masing-masing beban (derajat).

b. Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Listrik Tegangan Rendah PLTMh

Rugi-rugi daya (ΔP) pada penghantar disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada penghantar tersebut. Nilai rugi-rugi daya pada penghantar dapat dihitung berdasarkan persamaan (Hasan Basri, 1997) berikut ini:

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \times I^2 \times R$$

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \times I^2 \times r \times L$$

Bila bebannya S , maka arus yang mengalir pada penghantar adalah:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

atau:

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

atau:

Rugi-rugi daya dapat juga dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta P_{3\phi} = \frac{S^2 \times r \times L}{V^2}$$

atau:

$$\Delta P_{3\phi} = \frac{P^2 \times r \times L}{V^2 \times \cos^2 \phi}$$

Perbandingan rugi-rugi daya (ΔP) terhadap daya (P) yang disalurkan ke beban disebut rugi-rugi daya relatif.

$$\text{Rugi-rugi daya relatif} = \frac{\Delta P_{3\phi}}{P_{3\phi}}$$

$$\text{Rugi-rugi daya relatif} = \frac{S \times r \times L}{V^2} \times 100 \%$$

atau:

$$\text{Rugi-rugi daya relatif} = \frac{P \times r \times L}{V^2 \times \cos^2 \phi} \times 100 \% \quad (18)$$

dengan:

ΔP = rugi-rugi daya aktif (W)

P = daya aktif (kW)

S = daya semu (kVA)

V = tegangan sistem (kV)

I = arus yang mengalir pada penghantar

(A) (10)

L = panjang penghantar atau saluran (km) (11)

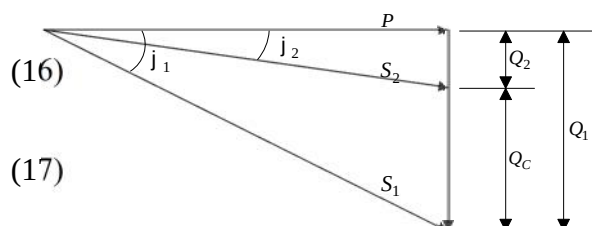
r = tahanan penghantar (Ohm/km)

$\cos \phi$ = faktor daya beban.

(12) Perbaikan Faktor Daya

Perbaikan faktor daya (PF) adalah memperbaiki perbedaan besar sudut daya aktif (W) dengan daya semu (VA) yang mengalir pada jaringan listrik, biasa dinyatakan dalam $\cos \phi$. Perbaikan faktor daya menjadi persoalan penting didalam masalah kelistrikan, karena semakin besar nilai $\cos \phi$ berarti semakin tinggi efisiensi jaringan listrik tegangan rendah tersebut.

(15) Untuk lebih jelas perbaikan faktor daya pada jaringan listrik dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2 (Hasan Basri, 1997) berikut ini:



Gambar. 2 Perbaikan faktor daya

Gambar 2 menunjukkan cara memperbaiki faktor daya pada jaringan listrik. Bila pada jaringan listrik dipasang kapasitor daya maka kapasitor daya tersebut diasumsikan sebagai sumber daya reaktif-kapasitif dan akan menekan daya reaktif dari beban. Misalkan bahwa daya aktif beban adalah sebesar P (kW), daya reaktif beban sebesar Q (kVAR) dan daya semu beban sebesar S (kVA). Bila diasumsikan beban disuplai dengan daya semu (S_1), daya reaktif tertinggal (Q_1), dengan faktor daya beban tertinggal, maka faktor daya adalah

$$\cos j_1 = \frac{P}{S_1}$$

$$\cos j_1 = \frac{P}{(P^2 + Q_1^2)^{1/2}}$$

Bila kapasitor shunt dengan kapasitas Q_C (kVAR) dipasang pada sisi beban maka faktor dayanya diperbaiki menjadi:

$$\cos j_2 = \frac{P}{S_2} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_2^2}}$$

$$\cos j_2 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_1 - Q_C)^2}}$$

Bila faktor daya semula disebut $\cos j_1$ dan diperbaiki menjadi $\cos j_2$ maka besarnya daya reaktif-kapasitif (Q_C) dari kapasitor yang diperlukan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Q_C = P(\tan j_1 - \tan j_2)$$

3. Motor Induksi Sebagai Beban PLTMh

Bila sebgaiian besar beban-beban PLTMh adalah beban bersifat induktif yaitu berupa motor-motor induksi maka timbul permasalahan pada saat pengasutan (*starting*). Permasalahannya adalah pada saat diasut dengan sistem *Direct On Line (DOL)*, motor yang berkapasitas besar, akan menimbulkan arus asut yang besar bisa mencapai 5 - 7 kali arus nominal beban penuh motor tersebut dan juga akan timbul drop tegangan sesaat (kedip tegangan) yang besar, kedip tegangan tersebut dapat merusak peralatan-peralatan elektronika yang terhubung dengan sistem. Untuk mengatasi masalah tersebut dapat dilakukan dengan salah satu cara, yaitu merubah cara asut dari sistem *DOL* ke sistem bintang-segitiga (*Y-Δ*).

3.1 Cara Pengasutan (*Starting*) *Direct On Line (DOL)*

Pengasutan dengan cara *DOL*, dimana motor induksi dihubungkan langsung dengan jaringan listrik atau jala-jala. Pada saat dioperasikan motor induksi tersebut akan menarik arus dari jaringan atau sumber tegangan 5-7 kali dari arus nominalnya (arus beban penuh) dan hanya menghasilkan torsi 1,5 sampai 2,5 kali torsi beban penuh. Proses pengasutan berlangsung selama lebih kurang 7 detik. Arus pengasutan yang besar tersebut dapat mengakibatkan drop tegangan sesaat

(*voltage sag*) pada jaringan sehingga akan mengganggu peralatan lain yang dihubungkan pada jaringan yang sama. Cara pengasutan langsung tersebut biasanya dilakukan pada motor-motor induksi berkapasitas kecil. Besarnya arus yang timbul pada saat pengasutan (*starting*) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$I_{ST} = (5 \text{ atau } 7) \times I_n$$

dengan:

I_{ST} = arus pengasutan (*starting*) (A) atau (%)

I_n = arus nominal motor beban penuh (A).

Sedangkan besarnya tegangan pada saat pengasutan motor dapat dihitung dengan persamaan (AS Pabla, 1994) berikut ini:

$$E_s = E_R + IR \cos \phi_R - IX \sin \phi_R$$

dengan:

E_s = tegangan antara fasa dengan netral pada jaringan (V)

E_R = tegangan antara fasa dengan netral pada beban (V)

I = arus pengasutan (*starting*) motor (A)

R = tahanan sistem (Ohm)

X = reaktansi sistem (Ohm)

$\cos \phi_R$ = faktor daya beban pada saat pengasutan

Maka drop tegangan (%) sesaat pada saat pengasutan motor dapat dihitung dengan persamaan (AS Pabla, 1994) berikut ini:

$$V_d (\%) = \frac{\sqrt{3}}{E_1} (IR \cos \phi_R - IX \sin \phi_R) \times 100$$

Dimana, E_1 adalah tegangan catu saluran ke saluran dan ϕ_R adalah negatif untuk faktor daya beban tertinggal dan positif untuk faktor daya beban mendahului. Dapat diambil bahwa faktor daya motor akan sekitar 0,3 pada saat pengasutan dan arus pengasutan (I_{ST}) dengan sistem *DOL* akan berkisar antara 5 sampai 7 kali arus nominal (I_n) beban penuh motor (biasanya diambil 6 bila tidak diketahui).

3.2 Cara Pengasutan (*Starting*) Bintang-Segitiga

Pengasutan (*starting*) dengan cara bintang-segitiga adalah memanfaatkan penurunan tegangan yang dicatu ke motor saat stator motor induksi terhubung dalam rangkaian bintang (*star*). Pada waktu pengasutan, yakni saat terhubung bintang, maka tegangan masing-masing fasa dikurangi sebesar $1/\sqrt{3}$ (57,7 %) dari tegangan saluran, oleh karena itu torsi yang timbul menjadi $1/3$ dari torsi awal atau *Locked Rotor Torque (LRT)*. Cara pengasutan bintang-segitiga mempunyai kelebihan atau keunggulan bila dibandingkan dengan cara *DOL* karena arus pengasutan akan turun menjadi $1/3$ dari arus pengasutan cara *DOL*. Besar arus yang timbul pada saat pengasutan motor dengan cara pengasutan bintang-segitiga (*Y-Δ*)

(26)

dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$I_{ST} = \frac{I_{DOL}}{3}$$

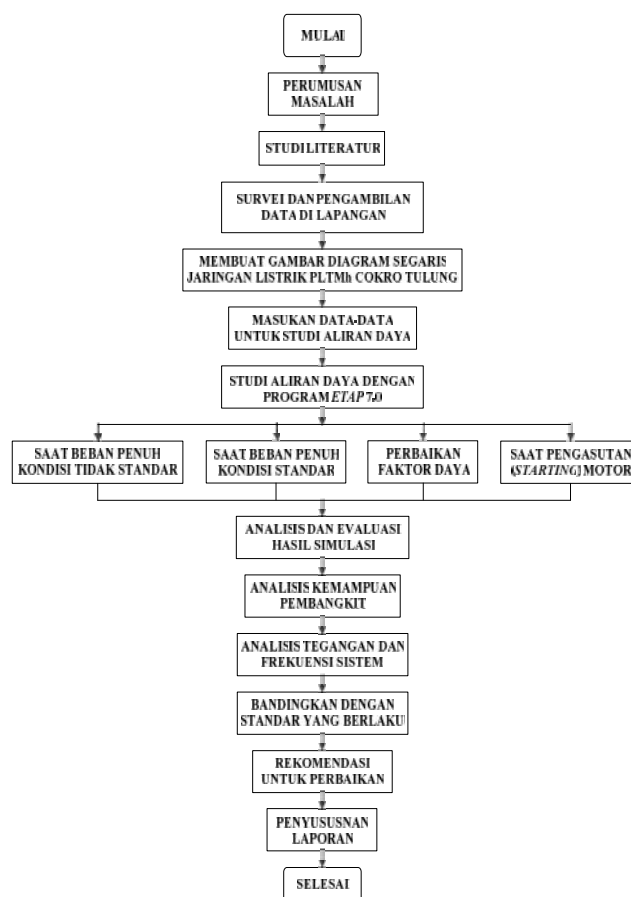
III. METODELOGI PENELITIAN

Adapun tahapan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Merumuskan masalah.
2. Studi literatur .
3. Melakukan survei lapangan dan pengambilan data di lapangan.
4. Membuat gambar di agram segaris (*one line diagram*) jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung pada halaman kerja program *ETAP*.
5. Masukan data-data untuk simulasi.
6. Melakukan studi aliran daya dengan menggunakan program komputer *ETAP* pada saat beban penuh kondisi tidak standar dan kondisi standar.
7. Melakukan analisis perbaikan faktor daya.
8. Melakukan analisis pada saat pengasutan (*starting*) motor
9. Mengolah dan menganalisis hasil simulasi dalam bentuk tabel dan grafik.
10. Menganalisis kemampuan pembangkit.
11. Menganalisis tegangan dan frekuensi sistem
12. Membandingkan hasil penelitian dengan standar yang berlaku.

13. Kesimpulan dan rekomendasi untuk perbaikan

14. Tahap terakhir menulis laporan
(27) Diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 3 berikut ini:



Gambar. 3 Diagram alir penelitian

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

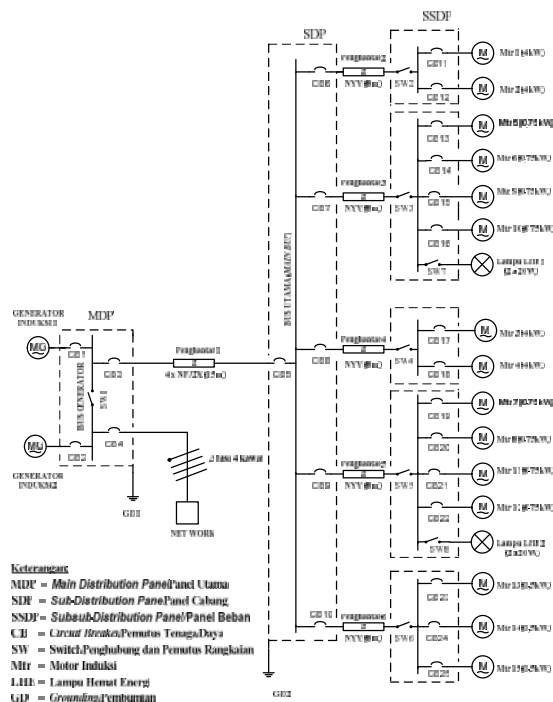
1. **Studi Aliran Daya (*Load Flow Study*) pada Jaringan Listrik PLTMh Cokro Tulung.**

Untuk mengetahui karakteristik, khususnya rugi-rugi daya dan drop

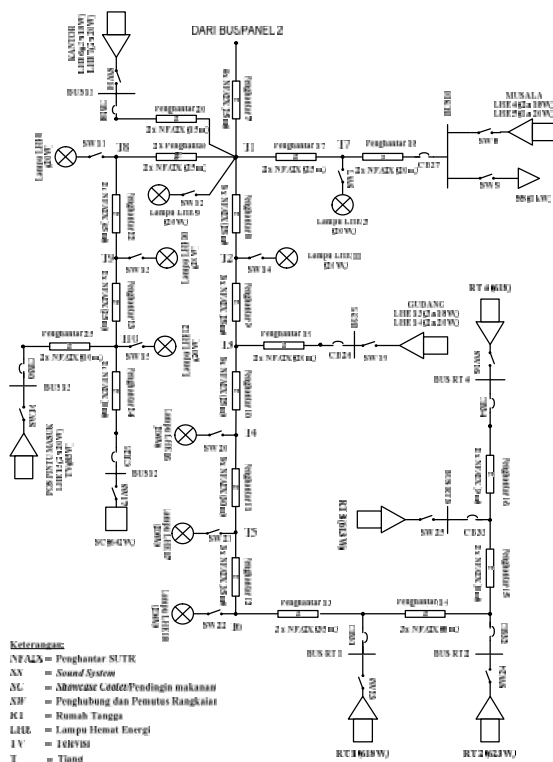
tegangan yang timbul pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung maka dilakukan studi aliran daya pada jaringan listrik tersebut dengan bantuan program *ETAP* (*Electrical Transient Analysis Programs*). Ada beberapa tahapan studi aliran daya yang dilakukan pada jaringan listrik tersebut, antara lain sebagai berikut:

1. Studi aliran daya pada saat beban penuh dengan kondisi tidak standar dan kondisi standar.
2. Analisis perbaikan faktor daya.
3. Analisis starting motor.

Sebelum dilakukan studi aliran daya maka terlebih dahulu membuat gambar diagram segaris pada dalam kerja program *ETAP*. Adapun bentuk gambar diagram segaris jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung seperti diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5 berikut ini:



Gambar. 4 Diagram segaris SKTR PLTMh Cokro Tulung



Gambar. 5 Diagram segaris SUTR PLTMh Cokro Tulung

Studi Aliran Daya pada Saat Beban Penuh Dengan Kondisi Tidak Standar dan Kondisi Standar

Studi aliran daya dilakukan pada jaringan PLTMh Cokro Tulung pada saat beban penuh dengan kondisi tidak standar, dimana tegangan sistem fasa-fasa atau tegangan tiga fasa sebesar 400 V dan tegangan sistem fasa-netral atau tegangan satu fasa sebesar 230 V. Sedangkan studi aliran daya pada saat beban penuh dengan kondisi standar, dimana tegangan sistem fasa-fasa atau tegangan tiga fasa sebesar 380 V dan tegangan sistem fasa-netral atau tegangan satu fasa sebesar 220 V.

a. Analisis Hasil Simulasi Sistem Tiga Fasa pada SKTR PLTMh Cokro Tulung

Untuk mendistribusikan atau menyulurkan daya dari pembangkit ke beban-beban induktif berupa motor-motor listrik, PLTMh Cokro Tulung menggunakan dua macam saluran, yaitu Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) dan Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) dengan sistem tiga fasa-empat kawat (Gambar 4). Jenis penghantar untuk SUTR adalah kabel *Twisted Isolated Cable (TIC)* dengan luas penampang 35 mm² dan jenis penghantar untuk SKTR adalah jenis kabel tanah NYY dengan luas penampang 6

mm². SUTR digunakan untuk menghubungkan rel daya (*bus/panel*) generator dengan rel daya (*bus/panel*) utama motor, sedangkan SKTR digunakan untuk menyalurkan daya dari bus/panel utama motor ke bus/panel motor listrik (motor pompa air). Hasil simulasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut ini:

TABEL 1

Data Hasil Simulasi Sistem Tiga Fasa pada SKTR (Kondisi Tidak Standar)

Unit Cabang				Rugi-Rugi Daya		Drop Tegangan	
Nama Penghantar	Penghubung		<i>l</i> (m)	ΔP (W)	ΔP (%)	Vd (V)	Vd (%)
Penghantar 1	Bus 1	Bus 3	15	136,74	0,364	1,070	0,268
Penghantar 2	Bus 3	Bus 4	8	20,459	0,054	0,600	0,150
Penghantar 3	Bus 3	Bus 5	8	4,371	0,012	0,250	0,063
Panghantar 4	Bus 3	Bus 6	8	20,459	0,054	0,600	0,150
Penghantar 5	Bus 3	Bus 7	8	4,371	0,012	0,250	0,063
Penghantar 6	Bus 3	Bus 8	12	12,419	0,033	0,550	0,138
Total rugi- rugi daya pada SKTR				198,819	0,529		

TABEL 2

Data Hasil Simulasi Sistem Tiga Fasa pada SKTR (Kondisi Standar)

Unit Cabang				Rugi-Rugi Daya		Drop Tegangan	
Nama Penghantar	Penghubung		<i>l</i> (m)	ΔP (W)	ΔP (%)	Vd (V)	Vd (%)
Penghantar 1	Bus1	Bus3	15	151,65	0,403	1,123	0,295
Penghantar 2	Bus3	Bus4	8	22,688	0,061	0,625	0,165
Penghantar 3	Bus3	Bus5	8	4,847	0,013	0,267	0,070
Panghantar 4	Bus3	Bus6	8	22,688	0,061	0,625	0,165
Penghantar 5	Bus3	Bus7	8	4,847	0,013	0,267	0,070
Penghantar 6	Bus3	Bus8	12	13,773	0,037	0,571	0,150
Total rugi- rugi daya pada SKTR				220,493	0,588		

Berdasarkan data-data pada Tabel 1 dan 2 dapat diketahui bahwa rugi-rugi daya total (ΔP_t) yang timbul pada SKTR adalah sebesar 198,82 W atau 0,053 % dari total daya keseluruhan (37,54 kW) (kondisi tidak standar) dan 220,493 W atau 0,59 % dari total daya keseluruhan (37,58 kW) (kondisi standar). Drop tegangan (ΔV) yang lebih besar timbul pada penghantar 1, sebagai penghantar utama SKTR, nilai drop tegangan (ΔV) yang timbul pada penghantar tersebut sebesar 1,07 Volt atau 0,27 % dari tegangan kerja atau tegangan nominalnya (400 V) (kondisi tidak standar) dan 1,123 V atau 0,3 % dari tegangan nominalnya (380 V) (kondisi standar).

Rugi-rugi daya dan drop tegangan pada SKTR lebih besar pada kondisi standar bila dibandingkan kondisi tidak standar, hal ini disebabkan pada kondisi tidak standar tegangannya lebih besar bila dibandingkan kondisi standar.

b. Analisis Hasil Simulasi pada Setiap Fasa SUTR PLTMh Cokro Tulung

Untuk menyalurkan daya dari pembangkit ke beban-beban rumah tangga dan lampu penerangan jalan menggunakan Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) sistem tiga fasa-empat kawat dengan tegangan sistem 400/230 V untuk kondisi tidak standar dan tegangan sistem 380/220 V untuk kondisi standar (Gambar 5). Jenis

penghantar untuk SUTR adalah jenis kabel udara *TIC NFA2X* dengan luas penampang 16 mm². SUTR dihubungkan dari bus generator (bus 2) ke beban-beban dengan titik sambung pada tiang-tiang dan jaringan listriknya dibentangkan di atas tiang. Tiang listrik yang digunakan berupa tiang lampu dengan konstruksi tiang besi dengan tinggi tiang 5 meter. Hasil simulasi pada masing-masing fasa SUTR seperti ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut ini:

TABEL 3

Hasil Simulasi pada Setiap Fasa SUTR PLTMh Cokro Tulung (Kondisi Tidak Standar)

Unit Fasa SUTR	l (m)	Rugi-Rugi Daya		Drop Tegangan	
		ΔP (W)	ΔP (%)	Vd (V)	Vd (%)
Penghantar fasa A	172	7,045	0,019	1,003	0,434
Penghantar fasa B	228	16,563	0,044	2,301	0,996
Penghantar fasa C	270	19,341	0,051	2,894	1,253
Total rugi- rugi daya SUTR		42,949	0,144	6,198	2,683

TABEL 4

Hasil Simulasi pada Setiap Fasa SUTR PLTMh Cokro Tulung (Kondisi Standar)

Unit Fasa SUTR	l (m)	Rugi-Rugi Daya		Drop Tegangan	
		ΔP (W)	ΔP (%)	Vd (V)	Vd (%)
Penghantar fasa A	172	7,935	0,021	1,06	0,484
Penghantar fasa B	228	18,456	0,049	2,885	1,317
Penghantar fasa C	270	21,558	0,057	3,049	1,392
Total rugi- rugi daya SUTR		47,949	0,127	6,994	3,193

Berdasarkan data-data pada Tabel 3 dan Tabel 4 dapat diketahui bahwa rugi-rugi daya total (ΔP_t) yang timbul pada SUTR masing-masing sebesar 42,949 Watt atau 0,144 % dari total seluruh daya (37,54 kW) yang mengalir pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung (kondisi tidak standar) dan 47,95 Watt atau 0,127 % dari total seluruh daya (37,58 kW) yang mengalir pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung (kondisi standar). Drop tegangan total (ΔV_t) yang timbul pada SUTR masing-masing sebesar 6,198 V atau 2,683 % dari tegangan nominalnya (230 V) (kondisi tidak standar) dan 6,994 V atau 3,193 % dari tegangan nominalnya (220 V) (kondisi standar).

1.2 Analisis Perbaikan Faktor Daya

Berdasarkan data-data hasil simulasi pada Tabel 5 dapat diketahui bahwa faktor daya atau *Power Factor (PF)* pada SKTR PLTMh Cokro Tulung sebesar 79,941 % (kondisi standar). Nilai faktor daya sebesar 79,941 % atau 80 % tersebut sudah bagus untuk sistem pembangkit yang berskala kecil, terutama untuk PLTMh, karena PLTMh yang bersekala kecil biasanya menggunakan motor induksi untuk generatornya. Namun untuk meningkatkan efisiensi sistem, terutama efisiensi jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung maka perlu dilakukan perbaikan faktor daya. Perbaikan

faktor daya direncanakan pada SKTR PLTMh Cokro Tulung dengan memasang kapasitor pada bus/panel 3 yang merupakan bus atau panel utama motor-motor pompa. Berdasarkan persamaan (23) dapat dihitung daya reaktif-kapasitif (Q_C) yang dibutuhkan, yaitu sebesar 8,746 kVAR perfasa dan nilai kapasitas kapasitor (C) yang dibutuhkan sebesar 194 μF perfasa. Hasil simulasi seperti ditunjukkan pada Tabel 6, 7 dan 8 berikut ini:

TABEL 5

Hasil Simulasi Sebelum Perbaikan Faktor Daya pada SKTR PLTMh Cokro Tulung (Standar)

Unit Bus		Data Pada Setiap Bus				
Nama Bus	Vt (kV)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	FD (%)	I (A)
Bus 1	0,3800	32,786	24,639	41,012	79,941	62,375
Bus 3	0,3789	32,634	24,639	40,891	79,807	62,375
Bus 4	0,3783	9,412	6,569	11,478	81,999	17,519
Bus 5	0,3786	4,023	3,464	5,309	75,782	8,096
Bus 6	0,3783	9,412	6,569	11,478	81,999	17,519
Bus 7	0,3786	4,023	3,464	5,309	75,782	8,096
Bus 8	0,3783	5,696	4,570	7,302	78,000	11,145

TABEL 6

Hasil Simulasi Setelah Perbaikan Faktor Daya pada SKTR PLTMh Cokro Tulung (Standar)

Unit Bus		Data Pada Setiap Bus				
Nama Bus	Vt (kV)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	FD (%)	I (A)
Bus 1	0,3800	32,753	15,852	36,388	90,011	55,287
Bus 3	0,3789	32,635	24,639	40,891	79,808	62,312
Bus 4	0,3783	9,412	6,569	11,478	82,000	17,519
Bus 5	0,3786	4,023	3,464	5,309	75,782	8,096
Bus 6	0,3783	9,412	6,569	11,478	82,000	17,519
Bus 7	0,3786	4,023	3,464	5,309	75,782	8,096
Bus 8	0,3783	5,696	4,57	7,302	78,000	11,145

TABEL 7
Jumlah Total Rugi-Rugi Daya Sebelum
Perbaikan Faktor Daya

Uraian	ΔP_t (Watt)	ΔP_t (%)
Total rugi-rugi daya pada SKTR	220,493	0,5867
Total rugi-rugi daya pada SUTR	47,949	0,1276
Jumlah Total Rugi-Rugi Daya	268,442	0,7143

TABEL 8
Jumlah Total Rugi-Rugi Daya Setelah
Perbaikan Faktor Daya

Uraian	ΔP_t (Watt)	ΔP_t (%)
Total rugi-rugi daya pada SKTR	188,235	0,501
Total rugi-rugi daya pada SUTR	47,946	0,1276
Jumlah Total Rugi-Rugi Daya	236,181	0,629

Berdasarkan data-data pada Tabel 5 dan Tabel 6 dapat diketahui bahwa setelah perbaikan faktor daya, maka terjadi peningkatan faktor daya pada bus 1 yang merupakan bus utama SKTR sebesar 10,06 % dari 79,941 % menjadi 90 % dan juga terjadi penurunan daya reaktif (Q) dan daya semu (S) masing-masing sebesar 8,787 kVAR atau 35,66 % dari 24,639 kVAR menjadi 15,852 kVAR dan 4,6242 kVA atau 11,27 % dari 41,012 kVA menjadi 36,388 kVA.

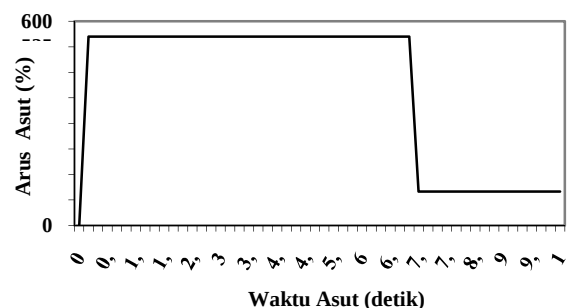
Berdasarkan data-data pada Tabel 7 dan Tabel 8 dapat diketahui juga bahwa setelah perbaikan faktor daya, rugi-rugi daya aktif total (ΔP_t) pada PLTMh Cokro Tulung dapat dikurangi sebesar 32,259

Watt atau 12,017 % dari 268,442 Watt menjadi 236,181 Watt

4.1.3 Analisis Pengasutan (*Starting*)

Motor

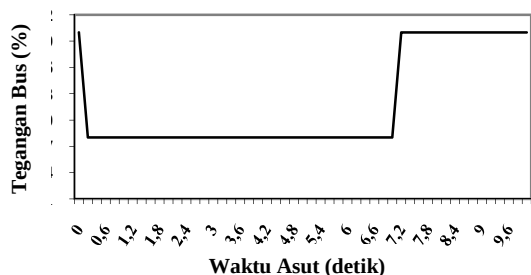
Analisis pengasutan motor dilakukan pada salah satu motor pompa (motor induksi) yang berkapasitas besar yaitu pada motor pompa 1, motor tersebut mempunyai daya sebesar 4 kW (5,5 HP). Simulasi dilakukan ketika motor pompa 1 diasut pada saat beban penuh kondisi standar tegangan 380 Volt dengan frekuensi 50 Hz. Waktu asut yang dibutuhkan sampai motor mencapai putaran nominalnya selama 7 detik. Berdasarkan hasil simulasi dapat digambarkan hubungan grafik arus asut, tegangan bus dan kebutuhan daya motor terhadap waktu asut seperti diperlihatkan pada Gambar 6, 7 dan 8 berikut ini:



Gambar. 6 Grafik hubungan arus
pengasutan motor terhadap waktu asut

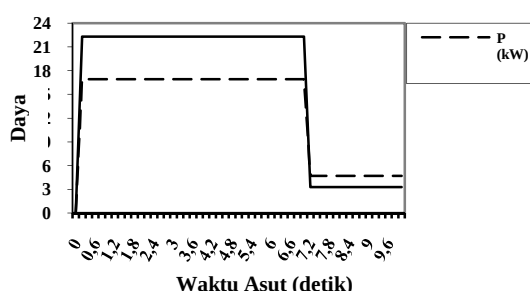
Pada Gambar 6 terlihat bahwa arus yang timbul pada saat pengasutan (*starting*) tinggi sekali mencapai 5,54 (554 %) dari

arus nominal motor beban penuh atau 48,25 A bila motor tersebut diasut (*start*) dengan sistem *DOL* (*Direct On Line*). Waktu pengasutan lebih kurang 7 detik.



Gambar. 7 Grafik hubungan tegangan bus terhadap waktu asut

Pada Gambar 7 terlihat bahwa timbul drop tegangan sesaat yang besar selama waktu pengasutan motor berlangsung lebih kurang 7 detik. Drop tegangan sesaat (kedip tegangan) yang timbul sebesar 45,6 V atau 12 % (dari 100 % menjadi 88 %), dimana tegangan pada bus turun dari 380 V menjadi 334,4 V. Drop tegangan sesaat tersebut dinamakan dengan kedip tegangan (*Voltage dip*).



Gambar. 8 Grafik hubungan kebutuhan daya motor terhadap waktu asut

Pada Gambar 8 terlihat bahwa pada saat pengasutan, daya reaktif (*Q*) lebih besar dibutuhkan oleh motor dari pada daya aktif (*P*), karena motor berupa lilitan atau bersifat induktif. Daya aktif (*P*) dan daya reaktif (*Q*) yang dibutuhkan motor pada saat pengasutan masing-masing sebesar 16,91 kW atau 4,2 kali (420 %) dari daya aktif (*P*) nominalnya (4,7 kW) dan 22,28 kVAR atau 6,8 kali (680 %) dari daya reaktif (*Q*) nominalnya (3,28 kVAR) selama periode waktu pengasutan dari 0 – 7 detik.

2 Analisis Kemampuan Pembangkit

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMh) Cokro Tulung menggunakan dua buah generator induksi untuk menghasilkan energi listrik. Masing-masing generator mempunyai kapasitas sebesar 30 kW, tegangan 380 V (hubungan Y), efisiensinya sebesar 0,789 (78,9 %) (motor induksi dioperasikan sebagai generator) dan faktor dayanya sebesar 0,87 (87 %). Berdasarkan data-data tersebut maka dapat dihitung kemampuan generator bila dioperasikan pada beban penuh kondisi standar.

Masing-masing generator mempunyai daya keluaran (*P_{out}*) sebagai berikut:

$$P_{Out} = P_{In} \times \eta$$

$$P_{Out} = 30000 \times 0,789$$

$$P_{Out} = 23670 \text{ Watt}$$

$$P_{Out} = 23,67 \text{ kW}$$

Jadi kapasitas pembangkit seluruhnya adalah

$$P_{Out} = 2 \times 23,67 \text{ kW}$$

$$P_{Out} = 47,34 \text{ kW}$$

Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa kapasitas seluruh beban yang dilayani oleh PLTMh Cokro Tulung adalah sebesar 37,58 kW. Jadi persentase kemampuan generator seluruhnya adalah:

$$P_{Out} = \frac{37,6}{47,34} = 0,795$$

$$P_{Out} = 0,795 \times 100 \% = 79,5 \% \text{ atau } 80 \%$$

Dengan pembebanan generator sudah mencapai 80 %, maka tidak mungkin lagi di tambah beban yang berkapasitas besar dan berdasarkan PUIL 2000 besarnya pembebanan generator rata-rata 80 persen dari kapasitas maksimalnya. Jadi generator tidak dibebani 100 % agar umur ekonomis dari generator menjadi lebih lama.

3 Analisis Tegangan dan Frekuensi Sistem

Berdasarkan data-data pengukuran lapangan pada bus atau panel generator, tegangan dan frekuensi sistem PLTMh Cokro Tulung yang sedang beroperasi sekarang ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk sambungan tiga fasa menggunakan tegangan 400 V (tegangan

antar fasa atau fasa ke fasa) dengan frekuensi sistem 55 Hz.

2. Untuk sambungan satu fasa menggunakan tegangan 230 V (tegangan antara fasa dengan netral) dengan frekuensi sistem 55 Hz.

Berdasarkan data-data tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan dan frekuensi sistem pada PLTMh Cokro Tulung tidak standar, karena berdasarkan PUIL 2000 tegangan dan frekuensi untuk sistem tegangan rendah yang berlaku di negara Indonesia adalah sebagai berikut:

Untuk sambungan tiga fasa menggunakan tegangan 380 V (tegangan antar fasa atau fasa ke fasa) dengan frekuensi sistem 50 Hz.

Untuk sambungan satu fasa menggunakan tegangan 220 V (tegangan antara fasa dengan netral) dengan frekuensi sistem 50 Hz.

4 Rekomendasi Untuk Perbaikan

Berdasarkan dari analisis yang telah dilakukan, maka dapat diberikan beberapa rekomendasi dan saran untuk perbaikan sistem PLTMh Cokro Tulung Kabupaten Klaten sebagai berikut:

Kemampuan PLTMh Cokro Tulung sudah maksimal (80 %) tidak bisa ditambah lagi beban yang besar. Untuk meningkatkan kapasitas daya terbangkit hanya bisa dilakukan dengan menambah ketinggian

jatuhnya air (*head*) (bedasarkan data hasil penelitian sebelumnya)

2. Sebaiknya motor-motor yang berkapasitas besar diasut (*starting*) dengan sistem bintang-delta ($Y-\Delta$) agar arus start (I_{ST}) dan drop tegangan sesaat (kedip tegangan) yang timbul tidak terlalu besar.
3. Sebagaimana besar beban PLTMh Cokro Tulung adalah beban-beabn induktif berupa motor-motor induksi sehingga faktor daya sistem menjadi rendah. Untuk meningkatkan faktor daya dan juga meningkatkan efesiensi jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung bisa dilakukan dengan menambah kapasitaor pada bus utama motor pompa (bus/panel 3).
4. Untuk mengatasi kompensasi lebih (*over compensaation*) akibat perubahan beban maka perlu dipasang alat pengatur faktor daya atau *APFR* (*automatic power factor Regulator*) pada panel pembangkit.
5. Berdasarkan pengamatan di lapangan tegangan dan frekuensi sistem PLTMh Cokro Tulung yang sedang berjalan sekarang ini tidak standar. Sebaiknya tegangan dan frekuensinya disesuaikan dengan stardar yang berlaku di Indonesia (standar PUIL 2000).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Rugi-rugi daya aktif total (ΔP_T) yang timbul pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung saat beban penuh sebesar 241,76 W atau 0,64 % dari daya total keseluruhan (37,54 kW) (kondisi tidak standar). Dan 268,442 W atau 0,714 % dari daya total keseluruhan (37,58 kW)(kondisi standar).
2. Drop tegangan yang timbul pada SKTR sebesar 1,07 V atau 0,268 % dari tegangan keja atau tegangan nominalnya (400 V) (kondisi tidak standar) dan 1,123 Volt atau 0,295 % dari tegangan nominalnya (380 V) (kondisi standar). Drop tegangan yang timbul pada SUTR masing-masing sebesar 6,198 Volt atau 2,683 % dari tegangan nominalnya (230 V) (kondisi tidak standar) dan 6,994 V atau 3,193 % dari tegangan nominalnya (220 V)(kondisi standar). Jadi rugi-rugi daya (ΔP) dan drop tegangan (ΔV) yang timbul pada jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung masih kecil, sehingga efesiensi

- jaringan listrik tersebut masih cukup baik.
3. Perbaikan faktor daya sampai dengan 90 % yang dilakukan pada jaringan listrik SKTR PLTMh Cokro Tulung dapat mengurangi rugi-rugi daya aktif total (ΔP_T) sebesar 12 % dan juga dapat mengurangi daya reaktif (Q) dan daya semu (S) masing-masing sebesar 35,7 % dan 11,3 %.
 4. Pengasutan (*starting*) motor dengan sistem *DOL* akan menimbulkan arus pengasutan (I_{ST}) yang besar mencapai 5,54 kali atau 554 % dari arus nominal motor beban penuh (48,3 A) dan menimbulkan drop tegangan sesaat (kedip tegangan) sebesar 45,6 V atau 12 %, dimana tegangan pada bus turun dari 380 V menjadi 334,4 V. Arus start (I_{ST}) dan drop tegangan yang besar tersebut dapat dikurangi dengan merubah cara start dari sistem *DOL* ke sistem bintang-segitiga (Y- Δ).
 5. Kemampuan PLTMh Cokro Tulung sudah maksimal, dimana daya yang disalurkan beban-beban sudah mencapai (35,7 kW) atau 80 % dari kapasitas terpasang (47,34 kW) dengan efisiensi 79,8 % (motor induksi dioperasikan sebagai generator).
 6. Dari sisi *power quality*, hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa tegangan (V) dan frekuensi (f) sistem yang beroperasi saat ini tidak standar (230/400 V dan 55 Hz).
 7. Rekomendasi yang diberikan untuk meningkatkan kehandalan jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung agar dapat beroperasi dengan baik. Tegangan dan frekuensi agar disesuaikan dengan standar yang berlaku di Indonesia (standar PUIL 2000) dan juga rekomendasi yang diberikan kiranya dapat memberi jawaban atas tujuan dari evaluasi jaringan listrik PLTMh Cokro Tulung Kabupaten Klaten, Propinsi Jawa Tengah.

Saran

Diharapkan adanya penelitian lanjutan tentang tegangan dan frekuensi sistem PLTMh Cokro Tulung yang tidak standar. Penyebab tidak standar, akibat yang ditimbulkan oleh tegangan dan frekuensi sistem yang tidak standar terhadap beban-beban yang dilayani oleh PLTMh Cokro Tulung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada bapak Suharyanto dan M Isnaeni BS yang telah banyak membantu penulis dalam melakukan penelitian ini, dan tak lupa juga penulis ucapakan banyak terima kasih kepada bapak Risanuri Hidayat yang telah banyak membantu dan membimbing penulis dalam hal pembuatan paper ini.

Daftar Pustaka

Basri, Hasan, *Sistem Distribusi Daya Listrik*, Jakarta : ISTN, 1997.

Basuki Kurniawan, “Mengapa Mikrohidro,” *Seminar Nasional Teknologi 2007 (SNT 2007)* ISSN : 1978 – 9777, Yogyakarta, 2007.

Cekdin Cekmas, *Sistem Tenaga Listrik: Contoh Soal dan Penyelesaiannya Menggunakan MATLAB*, penerbit ANDI Yogyakarta, 2010.

Ion Bostan Han, Dr, Prof, Bostan Viorel and Digheru Valeriu, Dr, Prof, “Conceptual Design Of The Electrical Micro-Hydro-Power Station For The Conversion Of Flowing Water Kinetic Energy Into Mechanical And Electrical,” *University Of Galati Fascicle XIV Mechanical Engineering*, ISSN 1224-5615, 2006.

Ion, C.P and Marinescu, “Micro Hydro Power Plant With Induction Generator Supplying Single Phase Loads,” *Bulletin of the Transilvania University of Brasov* , Vol. 2 (51), Series I, 2009.

Irianto Gagarin Chairul, “Suatu Studi Penggunaan Motor Induksi sebagai Generator: Penentuan Nilai Kapasitor Untuk Penyedia Daya Reaktif”, *Jurnal JETri*, Tahun Volume 3, Nomor 2, Februari 2004, Jurusan Teknik Elektro-FTI, Universitas Trisakti.

Mahalla, “Evaluasi Kinerja IMAG pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Cokro Tulung Kabupaten Klaten,” M.Eng, tesis, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2012.

Maher Phillip and Smith Nigel, *Pico Hydro For Village Power*, UK Department for International Development (DfID), May 2001.

Murty P. S. R, “Operation and Control in Power Systems,” *SSP BS Publications*: 4-4-309, Giriraj Lane, Sultan Bazar, Hyderabad - 500 095 A. P, India, ISBN: 978-81-7800-181-0, 2008.

Natural Resources Canada. Renewable and Electrical Energy Division. Energy Resources Branch, *Micro-Hydropower*

- Systems: A Buyer's Guide*. Ottawa, 2004.
- Operation technology, inc, ETAP 7.0 User Guide*, Southern California, U.S.A, May 2005.
- Pabla A.S, *Sistem Distribusi Daya Listrik*, Erlangga, Jakarta, 1994.
- Pai, M.A., *Computer Technigues in Power System Analysis*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1984.
- Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)*, Badan Standarisasi Nasional (BSN), Yayasan PUIL Jakarta, 2000.
- Porate Kishor and Raisonni. G.H, "Voltage Stability Enhancement of Low Voltage Radial Distribution Network Using Static VAR Compensaator: A Case Study", *Wseas Transactions On Power Systems*, ISSN: 1790-5060-Issue 1, Volume 4, January 2009.
- PRYSMIAN Cables and Systems, Catalogue Cables and Wires for the Installation*, Berlin, Germany.
- PT.PLN(Persero), Standar Konstruksi Sambungan Tenaga Listrik*, buku 2, PT PLN (PERSERO),Jalan Trunojoyo Blok M-I / 135, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan, tahun 2010.
- Shidiq Mahfudz, "Penurunan Jatuh Tegangan Dan Rugi Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Mikrohidro," *Jurnal EECCIS* Vol. IV, Juni 2010.
- Smith Nigel, *Motors as Generators for Micro-Hydro Power*, London, U.K.: Intermediate Technology Publications, ISBN 1 85339 286 3, 2001.
- Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 72 : 1987*, Jakarta: PT PLN (Persero), 1997.
- Suartika Made dan Arta I Wayan Wijaya, "Rekonfigurasi Jaringan Tegangan Rendah (JTR) Untuk Memperbaiki Drop Tegangan Di Daerah Banjar Tulangnyuh Klungkung," *Jurnal Teknologi Elektro* Vol. 9, No.2, Juli - Desember 2010.