BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diharapkan dari penelitian disertasi ini adalah mendapatkan generator induksi satu fasa penguatan sendiri, daya rendah, putaran rendah 500 rpm, dan keberhasilan proses pengasutan. Mengikuti metode penelitian seperti yang diuraikan pada Bab 1V, penelitian diawali dengan rekonstruksi kumparan stator mesin induksi, analisis impedansi mesin hasil rekonstruksi yang terdiri atas resistansi dan reaktansi mesin, dilanjutkan dengan pembahasan arus picu dan pengasutan generator.

Guna menjamin keberhasilan proses pengasutan generator induksi, dipasang dua kapasitor penguat. Dua kapasitor penguat tersebut dengan nilai yang berbeda, satu dipasang pada terminal kumparan utama dan satu pada terminal kumparan bantu. Rangkaian kedua kumparan tersebut satu sama lain dalam kondisi terpisah.

Pada awal pengasutan diperlukan arus picu pada rangkaian kumparan utama, sedang pada kumparan bantu tidak perlu dipicu, Arus picu didapat dari pelepasan muatan tersimpan dalam kapasitor penguat bertegangan awal. Dalam bab ini juga dibahas tentang simulasi dan eksperimen. Simulasi dan eksperimen arus picu maupun pengasutan generator dibuat hingga menghasilkan tegangan nominal dalam keadaan mantap.

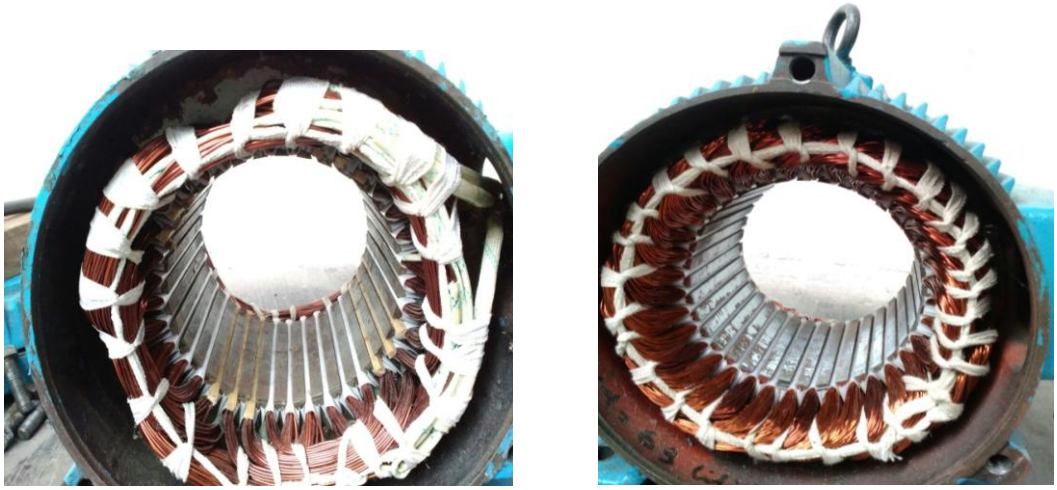
5.1 Rekonstruksi Kumparan Stator Mesin Induksi

Mesin yang digunakan sebagai bahan penelitian merupakan hasil rekonstruksi kumparan stator motor induksi satu fasa jenis motor kapasitor. Motor kapasitor semula berdaya 1,5 kW, putaran nominal rotor 1485 rpm, direkonstruksi menjadi generator induksi satu fasa 500 W, putaran sinkron 500 rpm. Kumparan stator yang dipilih untuk generator yang diteliti adalah kumparan dengan susunan yang digunakan pada motor kapasitor.

Motor kapasitor yang diteliti merupakan salah satu jenis motor induksi satu fasa dengan konstruksi yang sederhana (Sawhney, 1990). Motor kapasitor itu pada kondisi mantap, kumparan fasa utama dan kumparan fasa bantu tetap terhubung dengan sumber tegangan.

Mesin yang diteliti itu mempunyai jumlah alur 36. Jumlah alur untuk fasa utama adalah 24 alur dan untuk fasa bantu 12 alur. Dengan perbandingan jumlah alur 2:1 berdampak ketika mesin jadi generator kapasitas daya pada kumparan utama 2 kali daya kumparan bantu.

Gambar kumparan sebelum dan setelah direkonstruksi yang terlihat pada Gambar 5.1.

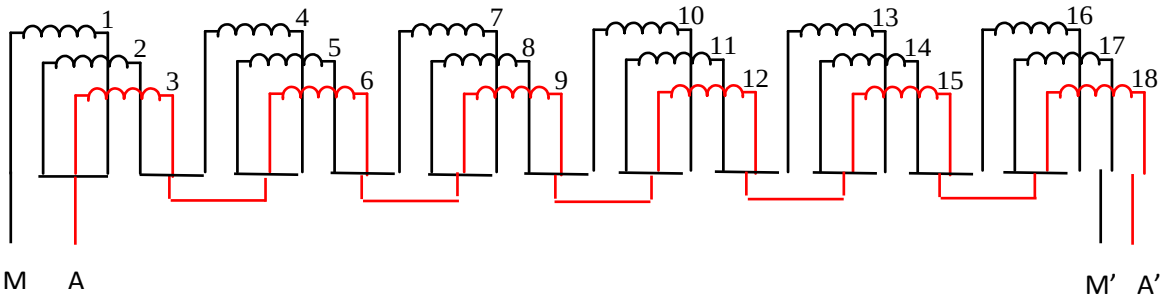


a. Kumparan sebelum rekonstruksi b. Kumparan setelah direkonstruksi

Gambar 5.1: Kumparan stator mesin induksi sebelum dan setelah direkonstruksi

Kumparan stator hasil rekonstruksi menjadi 18 kumparan individu, dengan pembagian 12 kumparan individu untuk fasa utama dan 6 kumparan individu untuk fasa bantu.

Bagan susunan kumparan hasil rekonstruksi seperti pada Gambar 5.2 dengan kumparan fasa utama berwarna hitam dan kumparan fasa bantu berwarna merah.



Gambar 5.2: Bagan susunan kumparan generator induksi hasil rekonstruksi

5.1.1 Jumlah lilit kumparan

Kumparan fasa utama dan kumparan fasa bantu dalam kondisi mantap dirancang bertegangan sama. Oleh karena itu jumlah lilit kumparan fasa utama harus dibuat sama dengan jumlah lilit kumparan fasa bantu. Jumlah lilit dihitung berdasarkan besar tegangan induksi pada kedua kumparan fasa tersebut. Tegangan induksi pada kumparan fasa berdasar Persamaan (2-5) yang ditulis kembali, (McPherson, *et al*., 1990; Langsdorf, 1955):

$$E = \sqrt{2} \cdot n_s \cdot N \cdot \emptyset \quad (5\text{-}1)$$

E: tegangan induksi kumparan (V)
n_s: putaran sinkron (rps)
N : jumlah lilit kumparan fasa (lilit)
$\emptyset$: fluks magnet kutub (Wb)

Untuk tegangan dan fluks magnet yang tetap, putaran sinkron diturunkan dari n_{s1}=1500 rpm menjadi n_{s2}= 500 rpm, oleh karena itu jumlah lilit kumparan fasa harus dinaikkan. Jumlah lilit kumparan fasa mesin yang direkonstruksi dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (5-1),:

$$E_1 = \sqrt{2} \cdot n_{s1} \cdot N_1 \cdot \emptyset_1$$
$$E_2 = \sqrt{2} \cdot n_{s2} \cdot N_2 \cdot \emptyset_2$$

Dengan :

E_1: tegangan induksi fasa mesin sebelum direkonstruksi
E_2: tegangan induksi fasa mesin setelah direkonstruksi
n_{s1}: putaran sinkron mesin sebelum direkonstruksi
n_{s2}: putaran sinkron mesin setelah direkonstruksi
N_1: jumlah lilit kumparan fasa mesin sebelum direkonstruksi
N_2: jumlah lilit kumparan fasa mesin setelah direkonstruksi
$\emptyset_1$: fluks magnet mesin sebelum direkonstruksi
$\emptyset_1$: fluks magnet mesin setelah direkonstruksi

Tegangan mesin sebelum dan setelah direkonstruksi dibuat tetap dan fluks magnetnya juga dipertahankan tetap, maka

$$E_1 = E_2$$
$$\sqrt{2} \cdot n_{s1} \cdot N_1 \cdot \emptyset_1 = \sqrt{2} \cdot n_{s2} \cdot N_2 \cdot \emptyset_2$$
$$n_{s1} \cdot N_1 = \cdot n_{s2} \cdot N_2$$
$$N_2 = \frac{n_{s1}}{n_{s2}} \times N_1 \quad (5\text{-}2)$$

Jumlah lilit kumparan fasa mesin sebelum direkonstruksi yang telah diuraikan pada Subbab 4.2 adalah sebesar 280 lilit. Dengan memasukkan nilai n_{s1}, n_{s2}, dan N_1 ke dalam Persamaan (5-2) didapatkan:

$$N_2 = \frac{1500}{500} \times 280 \text{ lilit} = 840 \text{ lilit}$$

Kumparan fasa utama mesin hasil rekonstruksi terdiri atas 12 kumparan individu yang sama dan terhubung seri, oleh karena itu jumlah lilit tiap kumparan individu pada fasa utama:

$$N_M = \frac{840}{12} \text{ lilit} = 70 \text{ lilit}$$

Kumparan fasa bantu terdiri atas 6 kumparan individu, karena jumlah lilit kumparan fasa bantu sama dengan jumlah lilit kumparan fasa utama, maka jumlah lilit tiap kumparan individu fasa bantu,

$$N_A = \frac{840}{6} \text{ lilit} = 140 \text{ lilit}$$

Mesin sebelum direkonstruksi berdaya 1500 W, dan setelah direkonstruksi menjadi 500 W. Tegangan kerja dipertahankan tetap, maka arus mesin yang telah direkonstruksi menjadi 1/3 dari arus mesin sebelumnya. Oleh karena itu luas penampang konduktor kumparan mesin yang direkonstruksi menjadi 1/3 dari luas penampang konduktor kumparan mesin sebelumnya.

Adapun data fisik mesin induksi satu fasa sebelum dan setelah direkonstruksi tersaji pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Data Fisik Mesin Induksi Satu Fasa Sebelum dan Setelah Rekonstruksi

Uraian	Sebelum Rekonstruksi	Setelah Rekonstruksi	Satuan
Daya (P)	1500	500	watt
Tegangan kerja (V)	220	220	volt
Diameter stator (D_s)	105,2	105,2	mm
Diameter rotor (D_r)	104	104	mm
Panjang inti stator/rotor (L)	84	84	mm
Jumlah kutub (p)	4	12	buah
Jumlah alur stator (S_S)	36	36	alur
Jumlah lilit fasa kumparan utama (N_M)	280	840	lilit
Jumlah lilit fasa kumparan bantu (N_A)	280	840	lilit
Luas penampang konduktor utama (a_M)	5,0	1,70	mm^2
Luas penampang konduktor bantu (a_A)	2,5	0,85	mm^2

5.1.2 Analisis resistansi kumparan stator mesin hasil rekonstruksi

Nilai resistansi kumparan berbanding lurus terhadap panjang kumparan, tahanan jenis bahan, dan berbanding terbalik dengan luas penampang konduktor.

Perhitungan panjang kumparan yang dipakai didasarkan dari berat konduktor, luas penampang konduktor, dan berat jenis bahan.

Bahan kumparan dari kawat tembaga berisolasi (kawat email tembaga), berat kumparan utama tertimbang 4,45 kg, berat kumparan bantu 2,225 kg, dan berat jenis tembaga BD C_u =8,9 gr/cm^3.

Berat kumparan = volume kumparan × berat jenis bahan

volume kumparan utama $= \frac{\text{berat kumparan}}{\text{berat jenis bahan}} = \frac{4450 \text{ gr}}{8{,}9 \ {}^{\text{gr}}/_{\text{cm}^3}} = 500,,6 \text{ cm}^3$

volume kumparan utama = luas penampang konduktor × panjang konduktor

panjang kumparan utama $l_M = \frac{\text{volume kumparan utama}}{\text{luas penampang konduktor}} = \frac{500{,}6\ cm^3}{1{,}7 \times 10^{-2}\ cm^2} = 29447$ cm

Untuk fasa utama diperoleh panjang kumparan l_{Main} = 29447 cm = 294,47 m. Kumparan fasa bantu dengan berat 2,225 kg, luas penampang konduktor 0,85 mm^2, terhitung panjangnya sama dengan panjang kumparan utama yaitu 294,47 m dan dibulatkan menjadi 294 m.

Resistansi jenis tembaga ρ = 1,72×10^{-8} Ωm = 1,72×10^{-5} Ω-mm (Mismail, 2011). Nilai resistansi kumparan utama dihitung dengan menggunakan Persamaan (4-2) yang ditulis kembali,

$$R_{1M} = \frac{l_M \times \rho}{a_M} \ (\Omega) \qquad (5\text{-}3)$$

Dengan memasukkan nilai-nilai resistansi jenis bahan ρ, dan luas penampang konduktor kumparan utama a_M ke dalam Persamaan (5-3), didapat nilai resistansi fasa kumparan utama:

$$R_{1M} = \frac{294 \times 10^3 \times 1{,}72 \times 10^{-5}}{1{,}7} \ (\Omega)$$

$$R_{1M} = 2{,}974\ \Omega$$

Dengan cara yang sama, untuk fasa kumparan bantu dengan luas penampang konduktor a_A =0,85 mm$_2$, diperoleh nilai resistansi:

$$R_{1A} = \frac{294 \times 10^3 \times 1{,}72 \times 10^{-5}}{0{,}85} \ (\Omega$$

Didapatkan nilai resistansi fasa kumparan bantu , R_{1A} = 5,948 Ω

5.1.3 Analisis reaktansi kumparan stator

Reaktansi kumparan didapat secara analisis seperti yang diuraikan pada Lampiran 1, Persamaan (L1-1) sampai dengan Persamaan (L1.12). Dengan menggunakan analisis reaktansi kumparan, dari 18 (delapan belas) kumparan individu yang terpisah, disambung menjadi dua kelompok fasa, yaitu fasa kumparan utama sebanyak 12 kumparan individu dan fasa kumparan bantu sebanyak 6 kumparan individu. Dari hubungan kedua fasa kumparan tersebut, dengan menggunakan analisis tensor, dihasilkan tensor reaktansi kemagnetan kumparan fasa generator induksi berupa matriks dua baris, dua kolom, seperti

yang diuraikan pada Lampiran L1, pada Persamaan (L1-17) diperoleh tensor reaktansi kemagnetan:

$$\mathbf{X'_m} = \begin{bmatrix} 51{,}02 & 0 \\ 0 & 103{,}76 \end{bmatrix} \tag{5-4}$$

Nilai pada baris 1, kolom 1 dari Persamaan (5-4), merupakan nilai reaktansi kemagnetan kumparan utama (X_{mM} = 51,02 Ω), dan nilai pada baris 2 kolom 2 merupakan nilai reaktansi kemagnetan kumparan bantu (X_{mA} =103,76 Ω). Pada baris 1 kolom 2 dan baris 2 kolom 1 bernilai 0. Hal ini karena kedudukan kedua kumparan berbeda fasa 90° listrik. Oleh karena itu tidak ada reaktansi kemagnetan bersama antara kumparan utama dengan kumparan bantu.

Dengan cara yang sama, menggunakan Persamaan (L1-26) didapat nilai reaktansi bocor kumparan fasa adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{X_L} = \begin{bmatrix} 14{,}65 & 0 \\ 0 & 30{,}66 \end{bmatrix} \tag{5-5}$$

Nilai pada baris 1 kolom 1 pada Persamaan (5-5) merupakan nilai reaktansi bocor kumparan utama (X_{1M} =14,65 Ω), dan pada baris 2 kolom 2 merupakan nilai reaktansi bocor kumparan bantu (X_{1A} =30,66 Ω).

5.1.4 Perbandingan nilai impedansi kumparan stator hasil analisis dan pengukuran

Nilai impedansi stator mesin setelah direkonstruksi berdasarkan analisis dan pengukuran dengan mengikuti metode pada Subbab 4.6, diberikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2: Nilai Impedansi Kumparan Stator Mesin Hasil Rekonstruksi

	Analisis (Ω)	Pengukuran (Ω)	Perbedaan (%)
Kumparan Utama			
Resistansi stator (R_{1M})	2,97	3,10	4,06
Reaktansi Kemagnetan (X_{mM})	51,02	55,14	7,47
Reaktansi Bocor stator (X_{lM})	14,65	16,23	9,76
Kumparan Bantu			
Resistansi stator (R_{1A})	5,95	6,20	4,03
Reaktansi Kemagnetan (X_{mA})	103,36	111,60	7,38
Reaktansi Bocor stator (X_{1A})	30,66	33,20	10,61

Data Tabel 5.2 menunjukkan bahwa perbedaan nilai resistansi antara hasil analisis dengan hasil pengukuran kurang dari 5%. Perbedaan nilai 5% masih dalam batas yang dapat diterima.

Reaktansi kemagnetan, baik pada kumparan utama maupun kumparan bantu, perbedaan antara hasil analisis dengan hasil pengukuran masih di bawah 7,5%. Untuk reaktansi bocor, baik pada kumparan utama maupun kumparan bantu perbedaan di bawah 11%. Perbedaan nilai tersebut terjadi karena dalam penelitian ini tidak memperhitungkan bentuk alur dan luas alur.

Oleh karena itu, nilai-nilai resistansi dan reaktansi yang digunakan untuk menentukan nilai kapasitor penguat, program simulasi maupun eksperimen arus picu dan pengasutan, adalah nilai-nilai dari hasil pengukuran.

5.1.5 Nilai resistansi beban dan nilai slip nominal

Beban yang terpasang pada penelitian ini adalah resistor. Nilai resistansi beban dihitung berdasarkan kapasitas daya pada kumparan utama dan kumparan bantu.

Daya nominal pada kumparan utama dihitung berdasarkan perbandingan kapasitas daya yang telah diuraikan pada Subbab 5.1. Daya pada kumparan utama 2/3 kali daya total generator yaitu,

$$P_{LM} = \frac{2}{3} \times 500 \text{ W} = 333{,}333 \text{ W}$$

Nilai resistansi beban pada kumparan utama diperoleh dari persamaan daya,

$$P_{LM} = I^2 R_L = \frac{V^2}{R_{LM}}$$

$$R_{LM} = \frac{V^2}{P_{LM}} \qquad (5\text{-}6)$$

Dengan tegangan terminal generator 220 volt, menggunakan Persamaan (5-6), diperoleh nilai resistansi beban nominal pada kumparan utama:

$$R_{LM} = \frac{220^2}{333{,}333} = 145{,}2 \ \Omega$$

Daya nominal pada kumparan bantu:

$$P_{LA} = \frac{1}{3} \times 500 \text{ W} = 166{,}666 \text{ W}$$

Dengan cara yang sama, diperoleh nilai resistansi beban nominal pada kumparan bantu

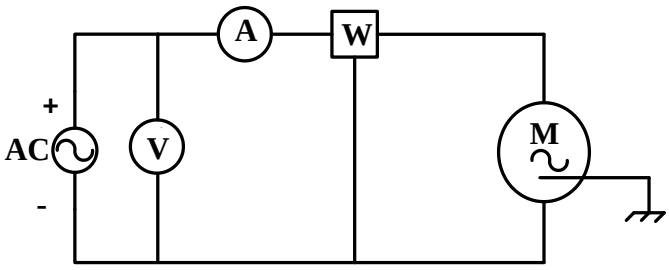
R_{LA} = 290,4 Ω.

Nilai slip nominal dihitung menggunakan Persamaan (2-7). Berdasarkan data pada mesin sebelum direkonstruksi, putaran nominal rotor sebesar 1485 rpm. Dengan besar slip per satuan sebelum dan sesudah direkonstruksi sama, diperoleh besar slip:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1485}{1500} = 0{,}01$$

5.1.6 Pengukuran resistansi rotor dan reaktansi bocor rotor

Resistansi dan reaktansi bocor rotor didapat dengan jalan pengujian dan pengukuran pada mesin dengan rotor ditahan, seperti yang diuraikan pada Subbab 4.6 dengan rangkaian uji yang ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3: Rangkaian uji mesin rotor ditahan

Keterangan Gambar 5.3:

AC : Catu tegangan bolak-balik
V : Volt meter
A : Ampere meter
W: Watt meter
M: Mesin induksi yang diteliti

Dengan memberikan tegangan catu V_{br} yang diatur hingga arus *I* yang masuk ke motor mencapai nilai yang ditentukan. Dari pengukuran diperoleh data arus *I*, tegangan V_{br}, dan daya masuk motor P_{ek}. Dalam pengukuran ditentukan arus bertahap mulai dari 0,25A sampai dengan 5 A untuk kumparan utama dan 0,25 A sapai dengan 3 A untuk kumparan bantu. Hasil pengukuran seperti yang diberikan pada tiga kolom pertama dalam Tabel 5.3 untuk kumparan utama dan dalam Tabel 5.4 untuk kumparan bantu.

Dari data arus, tegangan dan daya yang masuk motor rotor ditahan itu, dapat dihitung nilai impedansi ekuivalen Z_{ek}, resistansi ekuivalen R_{ek}, dan reaktansi ekuivalen X_{ek}

. Dengan menggunakan Persamaan (4-10) sampai dengan Persamaan (4-12), yang ditulis kembali menjadi:

$$Z_{ek} = \frac{V_{br}}{I} \ (\Omega) \quad (5\text{-}7)$$

$$R_{ek} = \frac{P_{ek}}{I^2} \ (\Omega) \quad (5\text{-}8)$$

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{ek})^2 - (R_{ek})^2} \ (\Omega) \quad (5\text{-}9)$$

V_{br}: Tegangan catu uji rotor ditahan (V)
I : Arus yang mengalir masuk motor (A)
Z_{ek}: Impedansi ekuivalen kondisi rotor ditahan (Ω)
R_{ek} : Resistansi ekuivalen kondisi rotor ditahan (Ω)
X_{ek} : Reaktansi ekuivalen kondisi rotor ditahan (Ω)

Tabel 5.3**:** Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Uji Motor Rotor Ditahan Kumparan Utama

Hasil Pengukuran			Hasil Perhitungan			
I (A)	V (V)	P (W)	Z_{ek} (Ω)	R_{ek} (Ω)	X_{ek} (Ω)	L_{ek} (H)
0,25	14,50	0,50	58,00	8,00	57,45	0,1829
0,50	27,80	2,00	55,60	8,00	55,02	0,1752
0,75	36,60	4,28	48,80	7,61	48,20	0,1537
1,00	47,50	7,50	47,50	7,50	46,90	0,1494
1,25	53,00	11,40	42,40	7,30	41,77	0,1331
1,50	60,25	16,90	40,17	7,51	39,46	0,1257
1,75	68,40	22,40	39,09	7,31	38,40	0,1223
2,00	77,25	30,80	38,63	7,70	37,85	0,1205
2,25	84,50	38,50	37,56	7,60	36,75	0,1170
2,50	91,10	48,75	36,44	7,80	35,60	0,1134
2,75	97,15	59,00	35,33	7,80	34,46	0,1097
3,00	105,00	70,65	35,00	7,85	34,11	0,1086
3,25	113,00	84,50	34,77	8,00	33,84	0,1078
3,50	120,10	98,00	34,31	8,00	33,37	0,1063
3,75	125,50	113,90	33,47	8,10	32,47	0,1034
4,00	132,85	128,00	33,21	8,10	32,23	0,1026
4,25	140,20	146,30	32,99	8,10	31,98	0,1018
4,50	147,50	164,00	32,78	8,08	31,76	0,1011
4,75	155,25	182,75	32,68	8,10	31,66	0,1008
5,00	163,00	202,00	32,50	8,00	31,58	0,1006

Resistansi ekuivalen hasil pengukuran mesin rotor ditahan, seperti yang diuraikan pada Subbab 4.6, merupakan penjumlahan dari resistansi stator dan resistansi rotor yang mengacu besaran stator,

$$R_{ekM} = (R_{1M} + R_{2M})\ \Omega \quad (5\text{-}10)$$

$$R_{2M} = (R_{ekM} - R_{1M})\ \Omega$$

Resistansi stator hasil pengukuran yang tertera dalam Tabel 5.2 R_{1M} =3,10 Ω, data resistansi dalam Tabel 5.3 untuk arus mendekati arus generator tanpa beban (I=3,75 A, R_{ek}=8,1 Ω), maka besar resistansi rotor fasa utama

$$R_{2M} = (8{,}1 - 3{,}1)\ \Omega = 5{,}0\ \Omega$$

Besar reaktansi ekuivalen rotor ditahan X_{ekM} sama dengan reaktansi bocor stator X_{1M} ditambah dengan reaktansi bocor rotor X_2,

$$X_{ekM} = (X_{1M} + X_{2M})\ \Omega \quad (5\text{-}11)$$

$$X_{2M} = (X_{ekM} - X_{1M})\ \Omega$$

Reaktansi stator hasil pengukuran yang tertera dalam Tabel 5.2 X_{1M} =16,23 Ω, dalam Tabel 5.3 pada arus 3,75 A hasil pengukuran reaktansi ekuivalen $X_{ekM} = 32{,}47\ \Omega$, maka besar reaktansi rotor fasa utama

$$X_{2M} = (32{,}47 - 16{,}23)\ \Omega = 16{,}24\ \Omega$$

Tabel 5.4**:** Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Uji Motor Rotor Ditahan Kumparan Bantu

Hasil Pengukuran			Hasil Perhitungan			
I (A)	V (V)	P (W)	Z_{ek} (Ω)	R_{ek} (Ω)	X_{ek} (Ω)	L_{ek} (H)
0,25	36,00	-	144,00	-	144,00	0,4558
0,50	41,30	4,00	82,69	16,00	81,04	0,2581
0,75	56,00	10,00	74,67	17,78	72,52	0,2310
1,00	71,50	16,00	71,50	16,00	69,69	0,2219
1,25	85,00	28,25	68,00	18,08	65,55	0,2088
1,50	99,30	40,50	66,20	18,00	63,71	0,2029
1,75	112,00	58,25	64,00	19,02	61,11	0,1946
2,00	126,30	75,00	63,15	19,00	60,22	0,1918

2,25	139,00	101,00	61,78	19,95	58,47	0,1862
2,50	152,20	127,50	60,88	20,40	57,36	0,1827
2,75	164,00	155,00	59,64	20,50	56,00	0,1784
3,00	176,50	182,5	58,83	20,28	55,23	0,1759

Nilai resistansi rotor dan reaktansi bocor rotor diperoleh dari perhitungan seperti pada fasa utama, dengan data hasil pengukuran ketika arus mendekati 50% dari fasa utama. Untuk ini nilai resistansi ekuivalen dan reaktansi ekuivalen yang digunakan pada pengukuran arus senilai 2A. Dengan menggunakan Persamaan (5-10) dan Persamaan (5-11) diperoleh nilai-nilai:

Resistansi rotor fasa bantu

$$R_{2A} = (R_{ekA} - R_{1A})\ \Omega$$

$$R_{2A} = (19{,}00 - 6{,}20)\ \Omega = 12{,}80\ \Omega$$

Reaktansi bocor kumparan fasa bantu

$$X_{2A} = (X_{ekA} - X_{1A})\ \Omega$$

$$X_{2A} = (60{,}22 - 33{,}20)\ \Omega = 27{,}02\ \Omega$$

5.1.7 Induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus.

Induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus *M = f(i)* nilainya turun ketika arus yang mengalir pada induktansi itu meningkat, dan mencapai minimum ketika terjadi kejenuhan magnet pada inti besi mesin (Mismail, 1989).

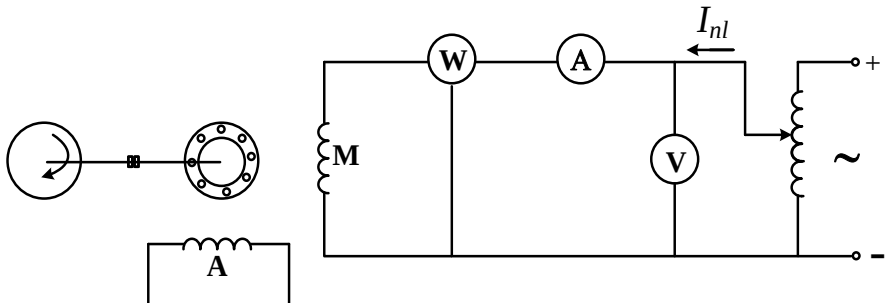
Dalam menangani kejenuhan magnet dalam mesin induksi diperlukan lengkung kemagnetan. Lengkung kejenuhan kemagnetan itu biasanya ditentukan dengan mengoperasikan mesin sebagai generator tanpa beban, dan membaca nilai-nilai tegangan kutub berdasarkan nilai arus stator.

Untuk motor induksi, mesin itu dioperasikan pada kecepatan sinkron dan arus kemagnetan diperoleh sesuai dengan tegangan stator yang diberikan.

Pada penelitian ini, induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus diperoleh dari pengukuran dan perhitungan motor tanpa beban. Dalam penelitian, dengan menggunakan penggerak motor listrik arus searah, mesin induksi yang diteliti diputar pada putaran sinkron 500 rpm, terminal motor dicatu tegangan dan diatur hingga arus yang mengalir ke mesin mencapai nilai yang ditentukan. Tegangan catu diatur sedemikian rupa hingga arus

yang mengalir ditentukan bertahap tiap 0,25 A dinaikkan hingga dicapai 5 A untuk kumparan utama, dan dari 0,25 A hingga 3 A untuk kumparan bantu

Rangkaian uji motor tanpa beban dari mesin yang direkonstruksi seperti Gambar 4.8 yang dilukis kembali menjadi Gambar 5. 4.



Gambar 5.4: Rangkaian uji motor tanpa beban

Data yang diukur secara langsung adalah arus yang masuk mesin I_{nl}, tegangan catu V_{nl}, dan daya yang diserap mesin P_{nl}. Selanjutnya dihitung berdasarkan Persamaan (4-16) sampai dengan Persamaan (4-21) berturut-turut diperoleh nilai impedansi (Z_{nl}), resistansi (R_{nl}) dan reaktansi (X_{nl}) mesin tanpa beban. Nilai-nilai tersebut ditulis kembali pada Persamaan (5-12) sampai dengan Persamaan (5-15). Induktansi kemagnetan M dihitung dari nilai reaktansi tanpa beban dibagi dengan frekuensi sudut ($\omega = 2\pi f$).

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}^2} \ (\Omega) \tag{5-12}$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^2} \ (\Omega) \tag{5-13}$$

$$X_{nl} = \sqrt{(Z_{nl})^2 - (R_{nl})^2} \quad (\Omega) \tag{5-14}$$

$$M = \frac{X_{nl}}{2\pi f} \ (\mathrm{H}) \tag{5-15}$$

Pengukuran dilakukan dengan arus yang masuk mesin ditentukan mulai dari 0,25 A hingga 5 A untuk kumparan utama, dan dari 0,25 A hingga 3 A untuk kumparan bantu. Data hasil pengukuran dan perhitungan motor tanpa beban diberikan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 : Data Hasil Pengukuran dan Pengukuran Motor Tanpa Beban Kumparan Utama

Hasil Pengukuran			Hasil Perhitungan			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
I_{nl}	V_{nl}	P_{nl}	Z_{nl}	R_{nl}	X_{nl}	M
(A)	(V)	(W)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(H)
0,25	16,00	0,75	64,00	12,00	62,86	0,2002
0,50	31,90	2,50	63,80	10,00	63,01	0,2006

0,75	47,00	5,50	62,67	9,78	61,90	0,1971
1,00	62,50	9,50	62,50	9,50	61,77	0,1967
1,25	77,00	14,50	61,60	9,28	60,90	0,1939
1,50	92,00	22,00	61,33	9,78	60,55	0,1928
1,75	107,00	30,00	61,14	9,80	60,35	0,1922
2,00	122,00	38,00	61,00	9,50	60,26	0,1919
2,25	132,00	49,50	58,67	9,78	57,85	0,1842
2,50	146,00	61,00	58,40	9,76	57,58	0,1834
2,75	160,00	74,00	58,00	9,78	57,25	0,1826
3,00	174,00	88,00	58,00	9,78	57,17	0,1820
3,25	187,50	103,00	57,69	9,75	56,86	0,1811
3,50	201,00	120,00	57,43	9,80	56,59	0,1802
3,75	210,00	138,00	56,00	9,81	55,13	0,1756
4,00	221,00	156,00	55,25	9,75	54,38	0,1732
4,25	232,00	176,00	54,59	9,74	53,71	0,1711
4,50	245,50	198,00	54,56	9,78	53,67	0,1709
4,75	248,00	220,00	52,21	9,75	51,29	0,1633
5,00	260,00	245,00	52,00	9,80	51,07	0,1626

Dari data arus tanpa beban I_{nl} pada kolom (1) dan induktansi kemagnetan M pada kolom (7) dalam Tabel 5.5, dengan metode Quasi-Newton, dapat diperoleh nilai-nilai konstanta yang dicari dalam Persamaan (4-19)

$$M(i) = \frac{\mathrm{K_1}}{\sqrt{\mathrm{K_2}+\mathrm{K_3} i^{\mathrm{K_4}}}}$$

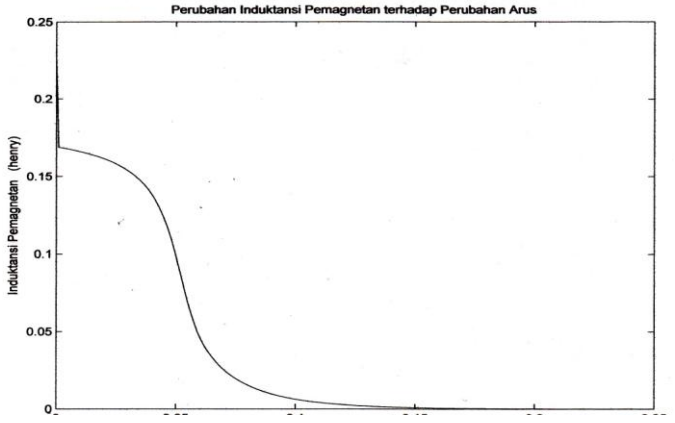
yang hasilnya sebagai berikut:

K_1 = 0,56996 , K_2 =4,0147 K_3 =3,48841 dan K_4 =0,61003

Dengan memasukkan konstanta K_1, K_2, K_3 dan K_4 ke dalam Persamaan (4-19) didapat Persamaan induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus menjadi:

$$M(i) = \frac{0{,}56996}{\sqrt{4{,}0147+3{,}48841 i^{0{,}61003}}} \qquad (5\text{-}16)$$

Dari Persamaan (5-16) tersebut, diperoleh kurva hubungan induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus seperti Gambar 5.5.



Gambar 5.5 : Kurva hubungan induktansi kemagnetan *M* terhadap arus *i*

Setelah didapatkan nilai-nilai resistansi stator, reaktansi bocor stator, resistansi rotor, dan reaktansi bocor rotor dari pengukuran, data generator induksi hasil rekonstruksi tersaji pada Tabel 5.6

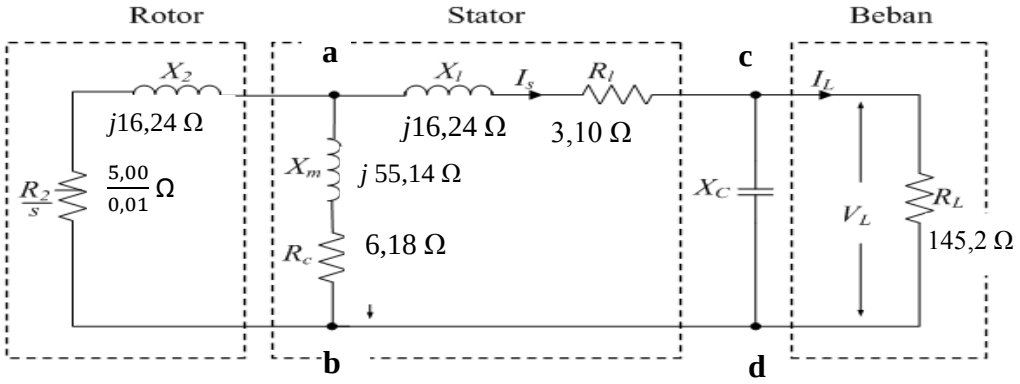
Tabel 5.6: Data Resistansi dan Reaktansi Generator Induksi Hasil Rekonstruksi

No.	Nama dan simbol	Nilai	Satuan
1	Resistansi stator kumparan utama (R_{1M})	3,10	Ω
2	Resistansi rotor mengacu besaran stator (R_{2M})	5,00	Ω
3	Resistansi inti besi kumparan utama (R_{cM})	6,18	Ω
4	Resistansi beban kumparan utama (R_{LM})	145,20	Ω
5	Reaktansi bocor stator kumparan utama (X_{1M})	16,23	Ω
6	Reaktansi bocor rotor mengacu besaran stator (X_{2M})	16,23	Ω
7	Reaktansi kemagnetan kumparan utama (X_{mM})	55,14	Ω
8	Resistansi stator kumparan bantu (R_{1A})	6,20	Ω
9	Resistansi rotor mengacu besaran stator (R_{2A})	12,80	Ω
10	Resistansi inti besi kumparan bantu(R_{cA})	12,42	Ω
11	Resistansi beban kumparan bantu (R_{LA})	290,4	Ω
12	Reaktansi bocor stator kumparan bantu (X_{1A})	33,20	Ω
13	Reaktansi rotor mengacu besaran stator (X_{2A})	27,02	Ω
14	Reaktansi kemagnetan kumparan bantu (X_{mA})	111,6	Ω

5.1.8 Kapasitor penguat

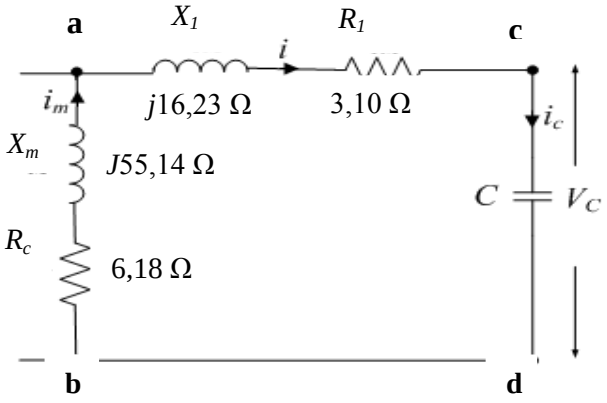
Kapasitor penguat diperlukan untuk menjamin keberhasilan proses pengasutan dan operasi kondisi mantap generator induksi satu fasa penguatan sendiri. Mengikuti uraian pada Subbab 4.11 dan Gambar 4.14, diperlukan dua kapasitor penguat. Satu kapasitor (C_M) dipasang pada kumparan utama, dan satu kapasitor (C_A) dipasang pada kumparan bantu.

Nilai kapasitor penguat dianalisis menggunakan bantuan gambar rangkaian pengganti generator induksi dalam kondisi mantap. Dengan memasukkan nilai-nilai resistansi, reaktansi yang terdapat dalam Tabel 5.6, dan slip *s* = 0,01 pada rangkaian pengganti Gambar 2.13 yang dilukis kembali menjadi rangkaian pengganti untuk kumparan fasa utama seperti Gambar 5.6.



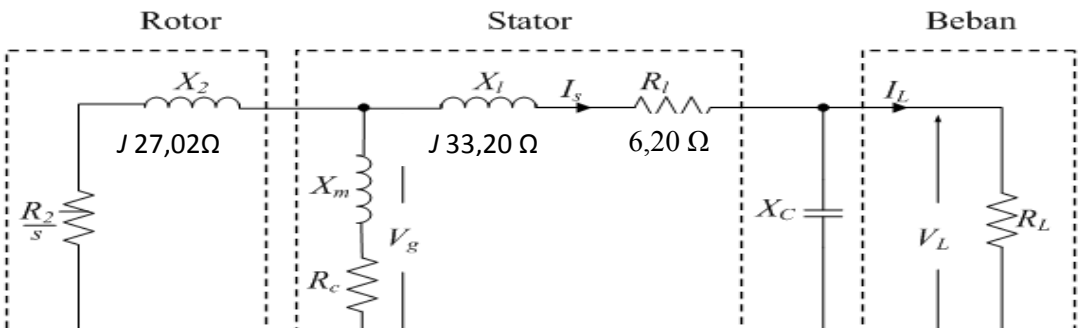
Gambar 5.6: Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa dengan beban nominal untuk kumparan utama

Rangkaian pengganti generator induksi kondisi tanpa beban dilukis dari Gambar 5.6, dengan membuat slip *s* = 0 yang menjadikan rangkaian sisi rotor terbuka, dan melepas beban R_L. Akibatnya *s*=0 dan melepas beban, rangkaian pengganti menjadi sederhana seperti Gambar 5.7



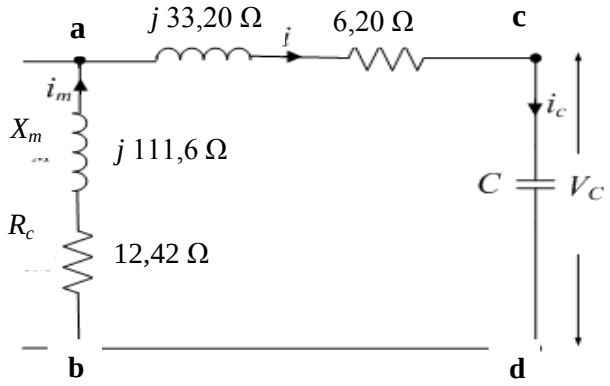
Gambar 5.7: Rangkaian pengganti generator induksi penguatan sendiri tanpa beban untuk kumparan utama.

Rangkaian pengganti generator induksi untuk kumparan bantu kondisi beban nominal disajikan pada Gambar 5.8..



Gambar 5.8: Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa dengan beban nominal untuk kumparan bantu

Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa tanpa beban untuk kumparan bantu disajikan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9: Rangkaian pengganti generator induksi penguatan sendiri tanpa beban untuk kumparan bantu.

Berdasarkan rangkaian pengganti Gambar 5.6 dan Gambar 5.7, dengan menggunakan analisis metode tegangan simpul yang diuraikan pada Lampiran L2, dapat diperoleh nilai kapasitor penguat yang diperlukan. Hasil analisis pada Lampiran L2, kapasitor penguat untuk kumparan utama pada beban nominal diperlukan 82 μF, dan untuk generator tanpa beban diperlukan 54 μF.

Dengan cara yang sama seperti perhitungan pada kumparan utama, dengan dasar Gambar 5.8 dan Gambar 5.9, kapasitor untuk kumparan bantu pada beban nominal diperlukan sebesar 41 μF, dan pada kondisi tanpa beban diperlukan sebesar 27 μF.

Generator tanpa beban dengan putaran sinkron dalam keadaan mantap, besar arus generator I_g sama dengan arus kapasitor I_C. Pada kondisi tanpa beban kapasitor yang perlu dipasang pada kumparan utama sebesar 54 μF. Arus generator dengan nilai kapasitor penguat sebesar 54 μF dan tegangan 220 volt dapat dihitung persamaan persamaan:

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} = 2\pi f C \times V_C \quad (5\text{-}17)$$

$$I_C = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 54 \times 10^{-6} \times 220 \text{ A}$$

$$I_C = 3{,}73 \text{ A}$$

Secara teoritis, besar arus generator tanpa beban pada kumparan utama,

$$I_{go} = 3{,}73 \text{ A}$$

5.2 Arus Picu dan Proses Pengasutan

Arus picu merupakan hasil pelepasan muatan tersimpan dalam kapasitor penguat bertegangan awal. Pemicuan generator induksi satu fasa penguatan sendiri hanya dilakukan pada kumparan utama (Santoso, *et al*., 2015; Santoso. *et al*., 2016). Bila pada kedua kumparan dilakukan pemicuan, dapat terjadi perbedaan fasa arus pada kedua kumparan. Akibat arus yang tidak sefasa, kemagnetan pada inti besi yang dilingkupi kedua kumparan tersebut saling melemahkan. Nilai arus picu tergantung dari impedansi mesin, kapasitor, dan tegangan awal kapasitor penguat.

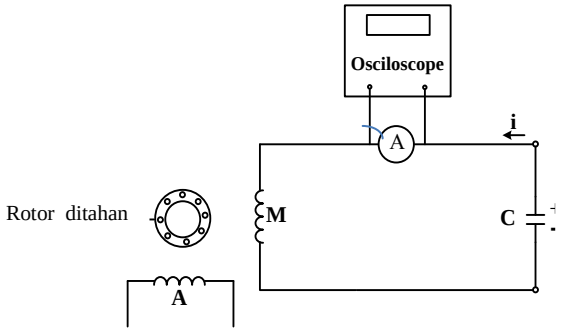
Proses pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah sulit berhasil tanpa bantuan arus picu (Santoso, *et al*., 2016).

Pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah dilakukan dalam keadaan tanpa beban. Sebelum pengasutan, kapasitor penguat bertegangan awal harus terlepas dari rangkaian, baik rangkaian kumparan generator maupun alat ukur listrik. Bila ada yang terhubung tertutup dengan kapasitor, muatan dalam kapasitor terlepas menyebabkan pengasutan tidak dapat dilaksanakan.

Untuk memprediksi apa yang akan terjadi terhadap arus picu dan proses pengasutan dilakukan simulasi menggunakan program MATLAB. Simulasi meliputi arus picu hasil pelepasan muatan tersimpan dalam kapasitor, dan pengasutan dengan beberapa tegangan awal kapasitor yang dilakukan dengan putaran di sekitar putaran sinkron. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan seberapa besar pengaruh impedansi, tegangan awal kapasitor, dan putaran terhadap keberhasilan pengasutan.

5.2.1 Arus picu

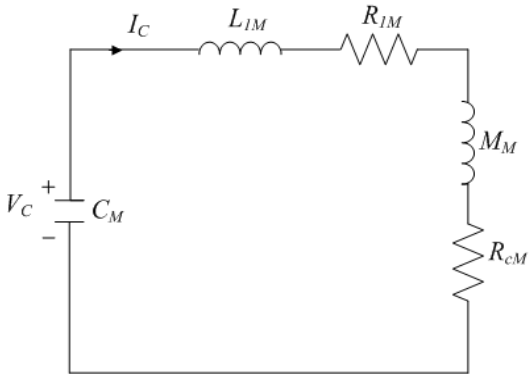
Arus picu didapat dengan menggunakan rangkaian seperti pada Gambar 5.10. Agar tidak ada pengaruh terhadap pelepasan muatan kapasitor yang bertegangan awal, maka rotor mesin ditahan.



Keterangan Gambar 5.10:
M: Kumparan Utama
A: Kumparan Bantu
C: Kapasitor bertegangan awal
S: Saklar putus/hubung
A: Ampere meter

Gambar 5.10: Rangkaian eksperimen untuk mendapatkan arus picu

Arus picu didapat dengan cara menutup saklar S pada rangkaian eksperimen. Rangkaian pengganti dari rangkaian eksperimen Gambar 5.10 adalah seperti Gambar 5.11.



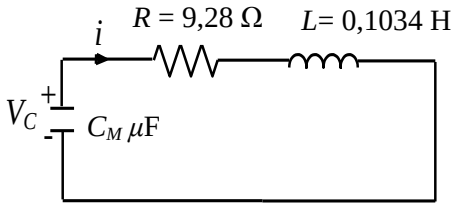
Gambar 5.11: Rangkaian pengganti proses pelepasan muatan tersimpan pada kapasitor

Resistansi ekuivalen mesin tanpa beban $R = R_{1M} + R_{cM}$
Induktansi ekuivalen mesin tanpa beban, $L = L_{1M}+M_M$

Berdasar hasil pengukuran dan perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.7, resistansi ekuivalen mesin tanpa beban R_{eknl} = 9,28 Ω. Induktansi ekuivalen hasil pengukuran yang tersaji pada Tabel 5.3 baris 15. Kolom 7, L_{eknl} = 0,1034 H.

Pada proses pengasutan, kapasitor yang dipasang di terminal kumparan utama C_M nilainya antara 54 μF sampai dengan 82 μF. Rangkaian ekuivalen dari rangkaian pengganti

generator tanpa beban pada Gambar 5.11 saat pelepasan muatan kapasitor disajikan pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12: Rangkaian ekuivalen saat pelepasan muatan dalam kapasitor

Arus picu yang mengalir dalam rangkaian ekuivalen merupakan arus transien yang dinyatakan dengan persamaan (Mismail, 2011):

$$i_T = i_F + i_N \tag{5-18}$$

i_F merupakan arus rangkaian dalam kondisi mantap. Dalam hal ini kapasitor bukan merupakan sumber tegangan tetap, maka nilai i_F sama dengan nol.

Karena $i_F = 0$, maka $i_T = i_N$

i_N merupakan arus tanggapan alamiah yang nilainya berubah terhadap waktu. Untuk nilai resistansi yang kecil arus alamiah dinyatakan (Mismail, 2011):

$$i_N = I_0 e^{\frac{-R.t}{2L}} \cos(\omega_N t + \theta) \text{ A} \tag{5-19}$$

Perubahan arus terhadap waktu

$$\frac{di_N}{dt} = -\frac{R}{2L} I_0 e^{\frac{-Rt}{2L}} cos(\omega_n t + \theta) - \omega_n I_0 e^{-\frac{Rt}{2L}} sin(\omega_n t + \theta) \text{ As}^{-1} \tag{5-20}$$

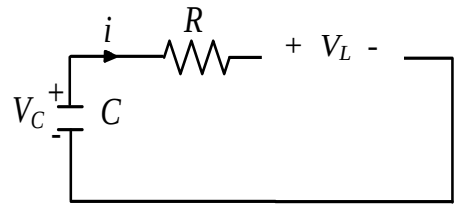
ω_n adalah frekuensi sudut alamiah yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \tag{5-21}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai *R* dan *L* yang sudah diketahui, dan *C* yang dipilih ke dalam Persamaan (5-21) diperoleh nilai frekuensi sudut alamiah fungsi kapasitor sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{10^6}{0{,}1034 \times C_M} - \left(\frac{9{,}28}{2 \times 0{,}1034}\right)^2}$$

Kondisi awal rangkaian ketika saklar ditutup (t=o), impedansi yang berasal dari induktor bernilai tak hingga (Mismail, 2011), rangkaian ekuivalen kondisi awal menjadi seperti pada Gambar 5.13,



Gambar 5.13: Rangkaian ekuivalen kondisi awal pelepasan muatan kapasitor

Pada kondisi awal rangkaian yaitu pada saat sakar ditutup, $t = 0$, arus rangkaian $i = 0$, dan tegangan pada induktansi sama dengan tegangan kapasitor $V_L=V_C$. Tegangan pada induktansi:

$$V_L = V_C = L\frac{di}{dt} \tag{5-22}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_C}{L}$$

Dengan memasukkan nilai t =0 pada Persamaan (5-19) dan (5-20) didapat,

$$i_N: \qquad 0 = I_0 \cos\theta \tag{5-23}$$

$$\frac{di_N}{dt}: \qquad \frac{V_C}{L} = -\frac{R}{2L} I_0 cos\theta - \omega_n I_0 sin\theta \tag{5-24}$$

Dari Persamaan (5-23) dan (5-24) didapat

$$\theta = 90^0$$

dan $$I_0 = -\frac{V_C}{\omega_n L}$$

Arus picu dari generator induksi yang diteliti merupakan arus tanggapan alamiah dengan persamaan:

$$i_N = -\frac{V_C}{\omega_n L} e^{\frac{-R.t}{2L}} \cos(\omega_n t + 90^0) \text{ A} \tag{5-25}$$

Hubungan amplitudo arus picu I_0 sebagai fungsi tegangan awal kapasitor V_C dan frekuensi sudut menjadi:

$$I_0 = -\frac{V_C}{\omega_n L} \text{ A} \tag{5-26}$$

Dengan memasukkan nilai L dan ω_n ke dalam Persamaan (5-25), didapat nilai arus picu sebagai fungsi tegangan awal kapasitor, frekuensi sudut alamiah, dan waktu untuk generator induksi yang diteliti sebagai berikut:

$$i_N = -\frac{V_C}{\omega_n \times 0{,}1034} e^{\frac{-9{,}28}{0{,}2068}t} \cos(\omega_n t + 90°) \text{ A}$$

$$i_N = -9{,}671 \frac{V_C}{\omega_n} e^{-44{,}847t} \sin\omega_n t \text{ A} \tag{5-27}$$

Proses pengasutan hanya dilakukan pada kumparan fasa utama, oleh karena itu simulasi dan eksperimen arus picu hanya dilakukan pada kumparan utama.

Simulasi arus picu menggunakan Persamaan (5-21) dan Persamaan (5-27). Dengan tegangan awal kapasitor V_C yang tetap, hubungan perubahan nilai kapasitor C_M terhadap nilai frekuensi sudut alamiah dan amplitudo awal arus picu diberikan pada Tabel 5.7. Dengan nilai kapasitor C_M yang tetap, pengaruh perubahan nilai tegangan awal kapasitor V_C terhadap amplitudo awal arus picu I_o dan frekuensi sudut alamiah ω_n disajikan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.7: Hubungan Nilai Kapasitor Terhadap Frekuensi Sudut Alamiah dan Amplitudo Awal Arus Picu

Kapasitor C_M (μF)	Tegangan awal kapasitor V_C (volt)	Frekuensi sudut alamiah ω_n (rad/s)	ω_n/ω_s (%)	Amplitudo awal arus picu I_0 (ampere)
54	160	321,582	102,41	2,873
58	160	308,062	98,11	2,999
62	160	297,741	94,82	3,103
66	160	288,366	91,84	3,204
70	160	279,800	89,11	3,302
74	160	271,933	86,60	3,397
78	160	264,674	84,29	3,490
82	160	257,947	82,15	3,581

Catatan:
Frekuensi sudut ω_n dibandingkan dengan frekuensi sudut sinkron (ω_s=314 rad/s)

Tabel 5.8: Hubungan Tegangan Awal Kapasitor Terhadap Frekuensi Sudut Alamiah dan Amplitudo Awal Arus Picu

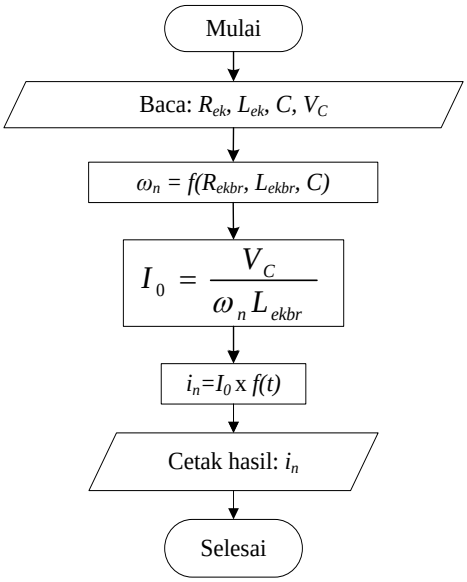
Kapasitor C_M (μF)	Tegangan awal kapasitor V_C (volt)	Frekuensi sudut alamiah ω_n (rad/s)	ω_n/ω_s (%)	Amplitudo awal arus picu I_0 (ampere)
68	100	286,538	91,25	2,015
68	120	286,538	91,25	2,418
68	140	286,538	91,25	2,821
68	160	286,538	91,25	3,224
68	180	286,538	91,25	3,627
68	200	286,538	91,25	4,030
68	220	286,538	91,25	4,433
68	240	286,538	91,25	4,836

Catatan: Frekuensi sudut dibandingkan dengan frekuensi sudut sinkron (ω_s=314 rad/s)
Dipilih C_M = 68 μF adalah nilai tengah antara 54 μF dengan 82 μF.

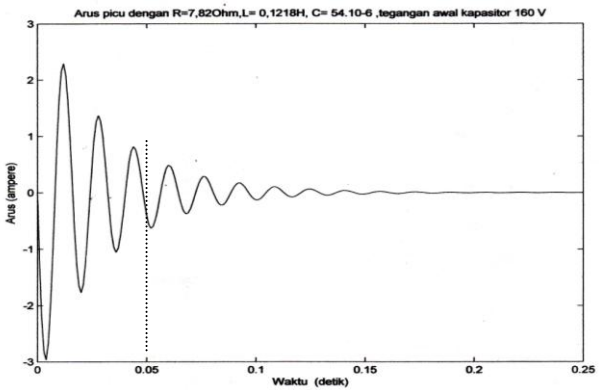
Dari Tabel 5.7 dan Tabel 5,8, terlihat bahwa dengan tegangan awal kapasitor V_C yang tetap, perubahan nilai kapasitor C_M berpengaruh pada perubahan nilai amplitudo awal

I_o dan frekuensi sudut alamiah arus picu ω_n. Untuk nilai kapasitor C_M yang tetap, perubahan tegangan awal kapasitor hanya berpengaruh terhadap amplitudo arus picu. Untuk memprediksi besar dan bentuk arus picu dilakukan simulasi.

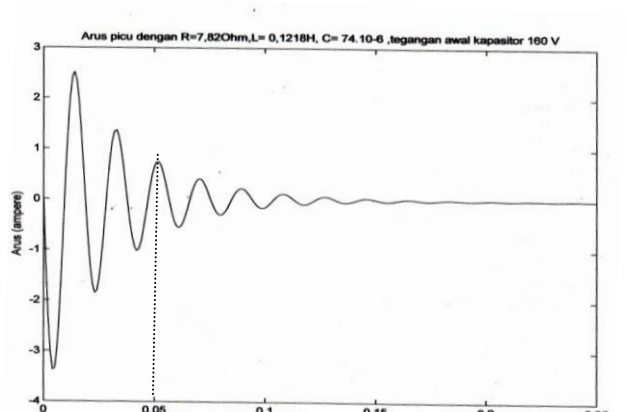
Simulasi arus picu menggunakan program MATLAB, dilakukan dengan langkah seperti bagan alir pada Gambar 5.14. *Listing program* simulasi diberikan pada Lampiran L4. Besar dan bentuk gelombang arus picu hasil simulasi disajikan pada Gambar 5.15 dan Gambar 5.16



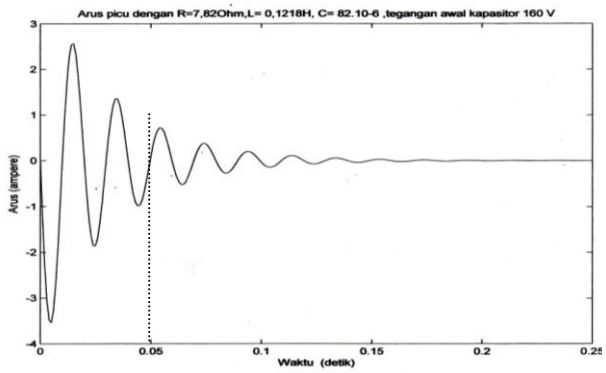
Gambar 5.14: Bagan alir program simulasi arus picu



5.15a: Nilai kapasitor penguat 54 μF, tegangan awal kapasitor 160 V.

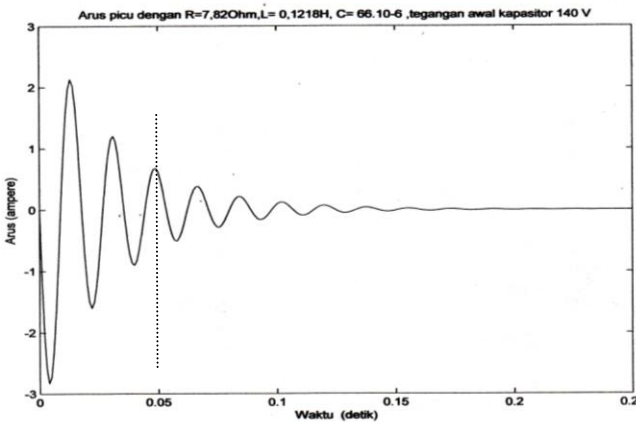


5.15b: Nilai kapasitor penguat 68 μF, tegangan awal kapasitor 160 V.

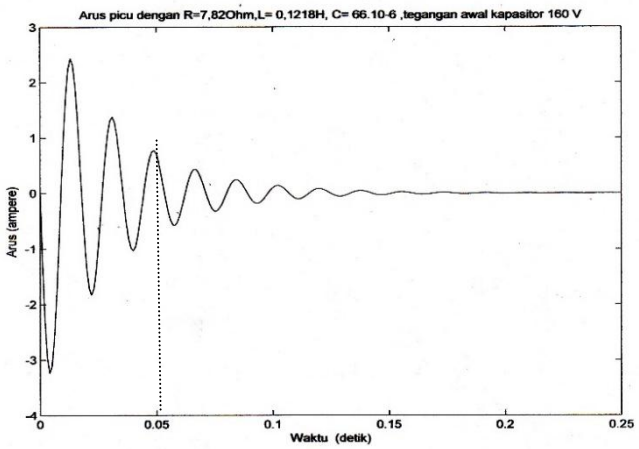


5.15c: Nilai kapasitor penguat 82 μF, tegangan awal kapasitor 160 V

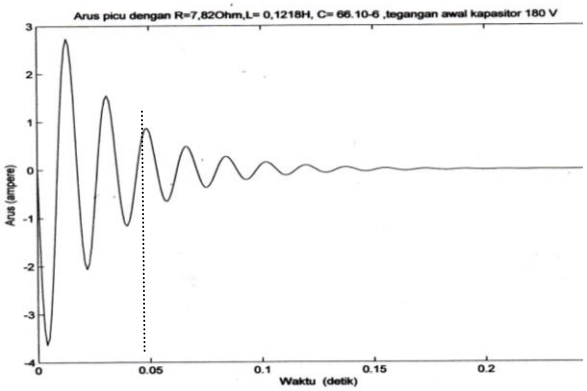
Gambar 5.15: Hasil simulasi pengaruh nilai kapasitor penguat C_M terhadap gelombang arus picu dengan tegangan awal kapasitor 160 volt



5.16a: Gelombang arus picu hasil simulasi dengan tegangan awal kapasitor 140 V



5.16b: Gelombang arus picu hasil simulasi dengan tegangan awal kapasitor 160 V



5.16c: Gelombang arus picu hasil simulasi dengan tegangan awal kapasitor 180 V

Gambar 5.16: Hasil simulasi pengaruh nilai tegangan awal terhadap gelombang arus picu dengan nilai kapasitor 68 μF.

Dari Gambar 5.15 dan Gambar 5.16, terbukti bahwa perubahan nilai kapasitor menyebabkan perubahan frekuensi sudut dan amplitudo arus picu. Perubahan nilai tegangan awal kapasitor hanya menyebab perubahan amplitudo arus picu.

5.2.2 Proses pengasutan

Proses pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah dilaksanakan dalam kondisi tanpa beban (Santoso, *et al*., 2016). Di samping operasi tanpa beban, harus dipasang dua kapasitor penguat. Satu kapasitor dipasang pada kumparan utama dan satu kapasitor dipasang pada kumparan bantu. Nilai kapasitor penguat yang diperlukan di atas keperluan generator tanpa beban, dan di bawah keperluan generator dengan beban nominal (Hanafy, *et al*., 2008; Boora, 2009; Santoso, *et al*., 2016).

Dari Subbab 5.1.6 diperoleh nilai-nilai kapasitor sebagai berikut:

- Pada kumparan utama untuk beban nominal C_{Mfl} = 82 μF dan untuk kondisi tanpa beban C_{Mnl} = 54 μF
- Pada kumparan bantu untuk beban nominal C_{Mfl} = 41 μF dan untuk kondisi tanpa beban C_{Mnl} = 27 μF

Dengan mengambil nilai antara didapatkan:

Untuk kumparan utama

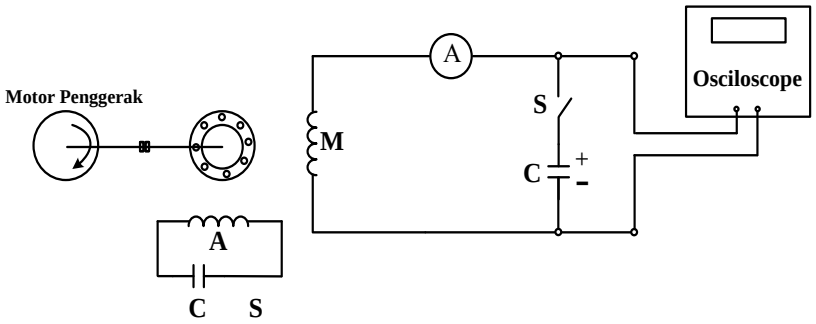
$$C_M = \frac{C_{Mfl} + C_{Mnl}}{2}\ \mu F = \frac{82 + 54}{2}\ \mu F = 68\ \mu F$$

Untuk kumparan bantu

$$C_A = \frac{C_{Afl} + C_{Anl}}{2}\ \mu F = \frac{41 + 27}{2}\ \mu F = 34\ \mu F$$

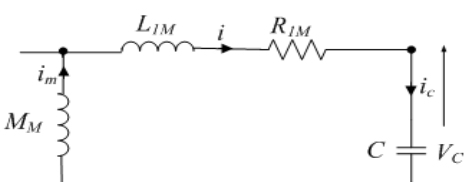
Pada proses pengasutan, pemicuan hanya dilakukan pada kumparan utama, sedang kapasitor kumparan bantu sudah harus terhubung sebelum proses pengasutan dilakukan (Santoso, *et al*., 2016). Bila dipicu pada kedua kumparan secara bersamaan tidak dijamin arus yang mengalir sefasa, sehingga kemagnetannya saling melemahkan.

Rangkaian untuk proses pengasutan seperti pada Gambar 4.14 yang dilukis kembali menjadi Gambar 5.17.



Gambar 5.17: Rangkaian uji pengasutan generator induksi penguatan sendiri

Model rangkaian proses pengasutan untuk Gambar 5.17 seperti Gambar 5.11 yang dilukis kembali menjadi Gambar 5.18.



Gambar 5.18: Rangkaian pengganti generator induksi tanpa beban

Dalam pengasutan resistansi ekuivalen $R = R_{1M} + R_{cM}$, sedang induktansi kemagnetan M_M tidak dijumlahkan dengan induktansi bocor L_{1M} (Hancock, 1974). Untuk kemudahan penulisan, dalam analisis ini simbol M_M diganti dengan M.

Dengan adanya pemicuan, arus pengasutan generator induksi i_g menjadi penjumlahan dua komponen arus. Dua komponen arus tersebut adalah arus generator karena tegangan remanensi pada Persamaan (2-31) dan arus picu pada Persamaan (5-27), yaitu:

$$i_g = i + i_N$$

$$i_g = I_r e^{-\left(\frac{\left(R-M\frac{d\theta}{dt}\right)}{2L}\right)t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC_M} - \frac{\left(R - M\frac{d\theta}{dt}\right)^2}{(2L)^2}}\right) t +$$

$$\left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t \text{ A}\right) \text{A} \qquad (5\text{-}28)$$

$\frac{d\theta}{dt}$ adalah kecepatan sudut mekanik yang nilainya tergantung dari putaran rotor generator n_r,

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{mek} = 2\pi n_r \quad \text{(rad/s)} \qquad (5\text{-}29)$$

$$i_g = I_r e^{-\left(\frac{(R-M\omega_{mek})}{2L}\right)t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC_M} - \frac{(R - M\omega_{mek})^2}{(2L)^2}}\right) t +$$

$$\left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t\right) \text{A} \qquad (5\text{-}30)$$

I_r : amplitudo arus generator karena tegangan remanensi

Frekuensi sudut generator induksi: $\omega_g = \left(\sqrt{\frac{1}{LC_M} - \frac{(R-M\omega_{mek})^2}{(2L)^2}}\right)$ (5-31)

Untuk n_r = 500 rpm = $\frac{500}{60}$ rps = 8,333 rps

$\omega_{mek} = 2 \times 3{,}14 \times 8{,}333$ rad/s = 52,333 rad/s

Dengan memasukkan nilai resistansi ekuivalen generator tanpa beban R_{Mnl} = 9,28 Ω dan induktansi ekuivalen generator tanpa beban L_{Mnl} = 0,1034 H , serta C = 68 μF ke dalam Persamaan (5-30) didapat:

$$i_g = I_r e^{-\left(\frac{(9{,}82-\omega_{mek}M)}{0{,}2068}\right)t} \sin\left(\sqrt{\frac{10^6}{0{,}1034\times 68}-\frac{(9{,}28-\omega_{mek}M)^2}{0{,}2068^2}}\right)t + \left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t\right) \text{ A} \quad (5\text{-}32)$$

$$i_g = I_r e^{-(47{,}485-4{,}836\omega_{mek}M)t} \times \sin\left(\sqrt{142223{,}234-\frac{(9{,}28-\omega_{mek}M)^2}{(0{,}2068)^2}}\right)t + \left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t\right) \text{ A}$$

Dalam penelitian ini, amplitudo tegangan remanensi yang dibangkitkan sangat rendah di bawah 1 volt sehingga arus karena tegangan remanensi dapat diabaikan. Dengan adanya pemicuan, amplitudo awal arus pengasutan menjadi sama dengan amplitudo arus picu.

Arus pengasutan generator menjadi:

$$i_g = -9{,}671\frac{V_C}{\omega_n} e^{-(47{,}485-4{,}836\omega_{mek}M)t} \times \sin\left(\sqrt{142223{,}234-\frac{(9{,}82-\omega_{mek}M)^2}{(0{,}4168)^2}}\right)t + \left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t\right) \text{A}$$

$$i_g = -9{,}671\frac{V_C}{\omega_n} e^{-(47{,}485-4{,}836\omega_{mek}M)t}\sin\omega_g t + \left(-9{,}671\frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t}\sin\omega_n t\right) \text{ A} \quad (5\text{-}33)$$

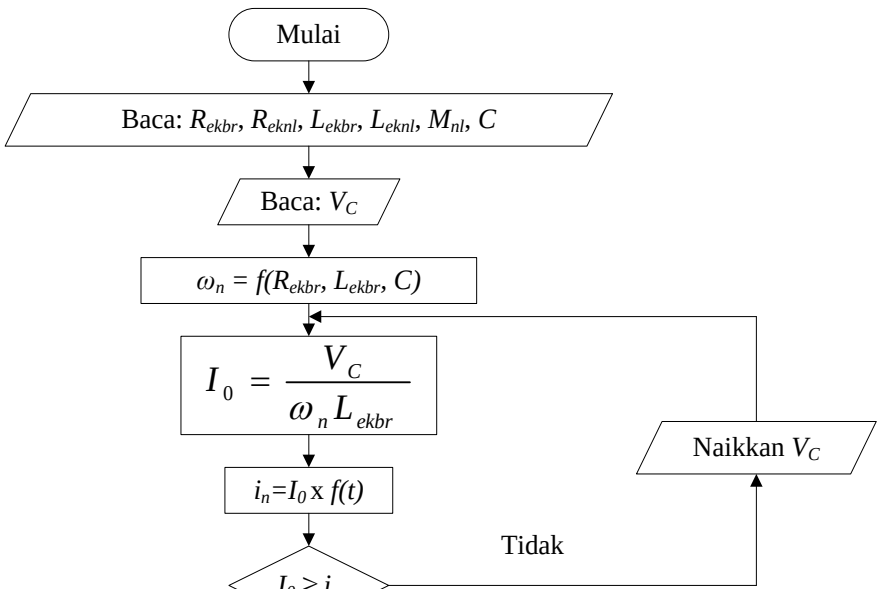
dengan $\omega_g = \left(\sqrt{142223{,}234-\frac{(9{,}82-\omega_{mek}M)^2}{(0{,}4168)^2}}\right) \text{Rad}/\text{s}$

Dari Persamaan (5-33) terlihat bahwa untuk nilai resistansi, induktansi, dan kapasitor yang ditentukan, nilai arus pengasutan tergantung pada tegangan awal kapasitor V_C, kecepatan sudut mekanik ω_{mek}, kecepatan sudut alamiah ω_n,, dan induktansi kemagnetan M yang nilainya berubah terhadap arus. Dari rangkaian pengganti Gambar 5.17, terlihat bahwa arus kapasitor i_C sama dengan arus generator i_g, tegangan kapasitor V_C sama dengan tegangan terminal generator. Oleh karena itu, tegangan terminal generator dapat diperoleh dari reaktansi X_C dikalikan dengan arus generator i_g , dengan menggunakan persamaan:

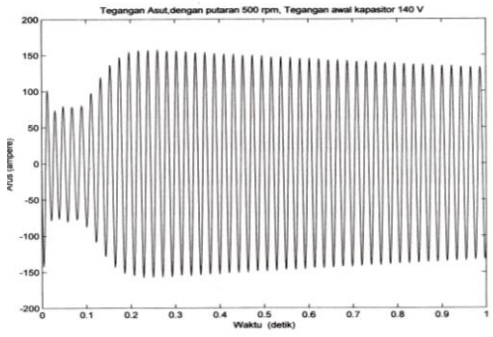
$$v_g = X_C \times i_g$$

$$v_g = X_C \left\{ -9{,}671 \frac{V_C}{\omega_n} e^{-(47{,}485 - 4{,}836\omega_{mek}M)t} \sin\omega_g t + \left(-9{,}671 \frac{V_C}{\omega_n}\, e^{-47{,}485t} \sin\omega_n t \right) \right\} \text{V} \quad (5\text{-}34)$$

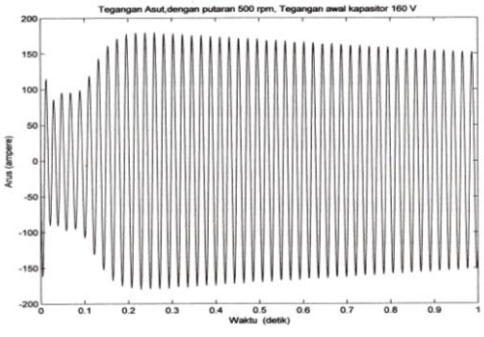
Program simulasi proses pengasutan menggunakan program MATLAB dengan bagan alir seperti Gambar 5.19 dan *listing program* simulasi pengasutan diberikan pada Lampiran L4. Bentuk gelombang tegangan pengasutan hasil simulasi disajikan pada Gambar 5.20.



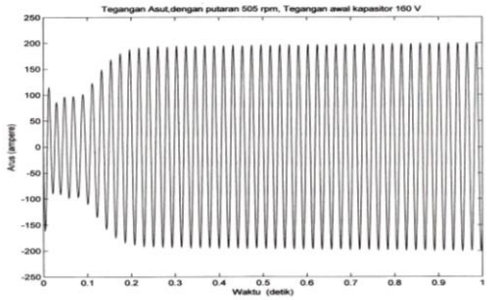
ambar 5.19: Bagan alir program simulasi proses pengasutan



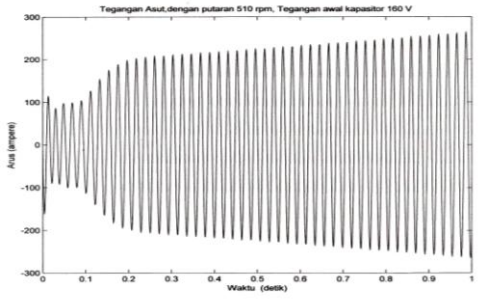
Gambar 5.20a



Gambar 5.20b



Gambar 5.20c



Gambar 5.20d

Gambar 5.20: Bentuk gelombang tegangan proses pengasutan hasil simulasi

Keterangan Gambar 5.20:

Gambar 5.20a: Gelombang tegangan pengasutan, putaran generator 495 rpm dengan tegangan awal kapasitor 160 V.

Gambar 5.20b: Gelombang tegangan pengasutan, putaran generator 500 rpm dengan tegangan awal kapasitor 160 V.

Gambar 5.20c: Gelombang tegangan pengasutan, putaran generator 505 rpm dengan tegangan awal kapasitor 160 V.

Gambar 5.20d: Gelombang tegangan pengasutan, putaran generator 510 rpm dengan tegangan awal kapasitor 160 V.

Berdasarkan Persamaan (5-34) dan hasil simulasi yang disajikan pada Gambar 5.20, dapat disimpulkan keberhasilan pengasutan ditentukan oleh nilai impedansi dan putaran generator. Untuk tegangan awal kapasitor penguat yang sama sebesar 160 V, putaran di bawah putaran sinkron 495 rpm, tegangan yang dibangkitkan generator dapat meningkat tetapi menyusut kembali hingga ke nol volt. Untuk putaran 2% di atas putaran sinkron (510 rpm) tegangan generator terus meningkat hingga di atas tegangan nominal.

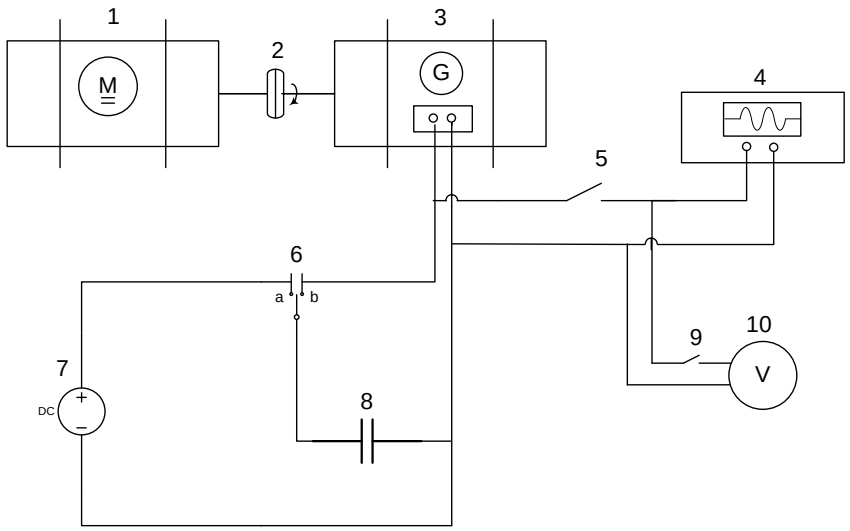
5.3 Eksperimen Arus Picu dan Proses Pengasutan

Proses pengasutan generator induksi berlangsung dengan selang waktu antara 0,8 detik sampai dengan 1,2 detik (Mismail, 1989; Ojo, *et al*., 1995; Bodson, *et al*., 2012; Leicht, *et al*., 2013). Oleh karena itu dalam eksperimen ini, selang waktu yang digunakan antara 0,25 detik hingga 1 detik.

Hasil eksperimen di laboratorium merupakan rekaman gelombang arus picu dan gelombang tegangan pengasutan yang direkam menggunakan osciloscope dengan selang waktu 0,25 detik untuk arus picu, dan selang waktu 1 detik untuk tegangan pengasutan.

Pengasutan dilakukan pada putaran di sekitar putaran sinkron dengan tegangan awal kapasitor yang berbeda. Nilai tegangan awal kapasitor yang dipilih didasarkan amplitudo awal arus picu mendekati arus generator tanpa beban.

Eksperimen untuk mendapatkan arus picu dan tegangan pengasutan dilakukan dengan skema bagan peralatan seperti Gambar 5.21.

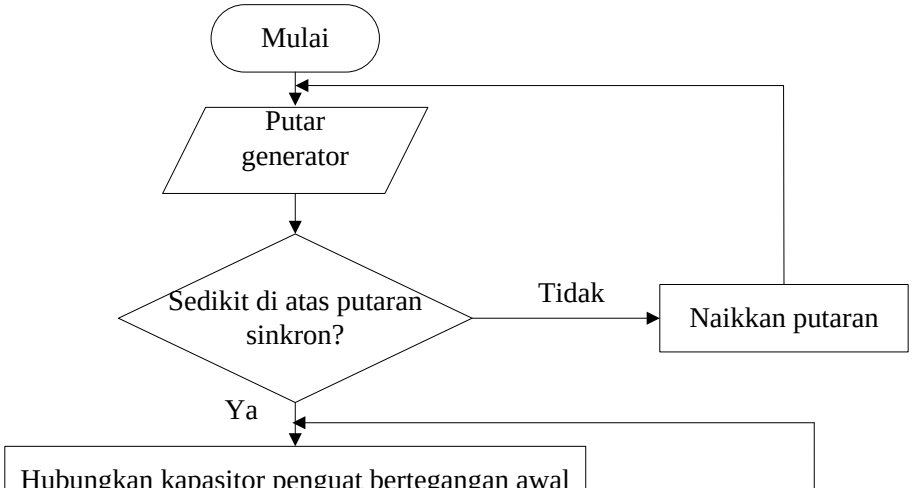


Gambar 5.21: Skema hubungan peralatan untuk arus picu dan tegangan pengasutan

Keterangan Gambar 5.21

1. Mesin penggerak, motor arus searah penguat terpisah 5 kW
2. Kopling mekanik
3. Generator induksi satu fasa penguatan sendiri yang diteliti
4. Osciloscope, alat tampilkan dan perekam gelombang arus picu dan tegangan asut,
5. Saklar penghubung antara terminal generator dengan osciloscope dan volt meter
6. Saklar pindah
7. Sumber tegangan searah
8. Kapasitor penguat
9. Saklar putus/sambung antara volt meter dengan terminal osciloscope.
10. Volt meter, alat ukur untuk memperjelas apakah tegangan sudah nominal

Eksperimen dilaksanakan dengan urutan kerja seperti skema bagan alir Gambar 5.22



Gambar 5.22: Bagan alir urutan kerja eksperimen proses pengasutan

Proses pengasutan dilaksanakan dengan langkah-langkah seperti bagan alir Gambar 5.22:

1. Persiapan dengan lidah kontak saklar pindah (6) dalam Gambar 5.21 pada posisi a, kapasitor terhubung dengan sumber tegangan searah, terjadi pengisian energi ke kapasitor.
2. Putar generator induksi hingga dicapai putaran sedikit di atas putaran sinkron
3. Tetap jaga saklar penghubung volt meter (9) tetap terbuka, dilanjutkan dengan penutupan saklar penghubung (5) antara terminal generator dengan osciloscope
4. Memindahkan lidah kontak saklar pindah (6) pada posisi b, terjadi pelepasan energi kapasitor sehingga mengalir arus picu ke dalam generator.
5. Rekam arus picu dan tegangan pengasutan menggunakan osciloscope,

   Bilamana rekaman osciloscope dalam selang waktu satu detik tegangan kembali menyusut menuju nol, diulangi mulai dari langkah 1 hingga 5 dengan tegangan awal kapasitor yang lebih tinggi hingga tegangan generator dalam keadaan mantap dicapai.
6. Tegangan generator yang sudah dalam keadaan mantap diukur menggunakan volt meter dengan jalan menutup sakar penghubung (9).

Bilamana tegangan belum mencapai nominal, putaran generator dinaikkan hingga dicapai tegangan nominal.

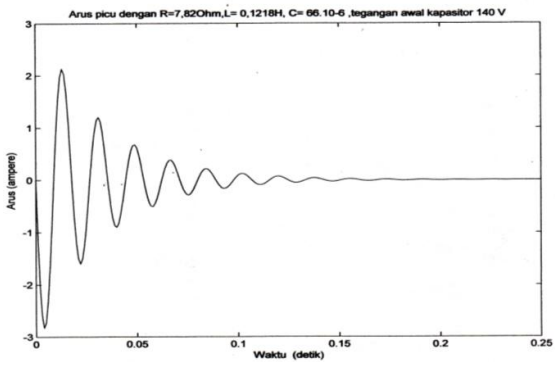
Untuk mendapatkan arus picu yang dikerjakan dimulai dari 1 loncat ke 3 (generator tidak diputar) dan berhenti pada langkah ke 5.

Gelombang arus picu dan gelombang tegangan pengasutan hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen disajikan pada Subbab 5.3.1 untuk arus picu, dan Subbab 5.3.2 untuk tegangan pengasutan.

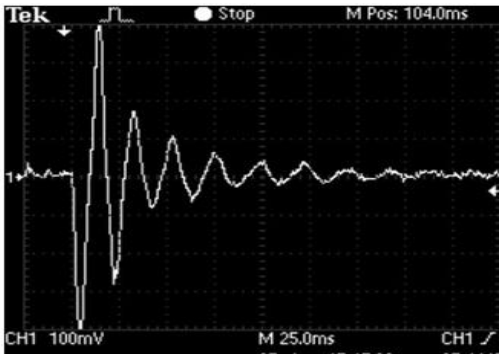
5.3.1. Perbandingan gelombang arus picu hasil simulasi dengan hasil eksperimen

Gelombang hasil simulasi disandingkan dengan gelombang hasil eksperimen untuk mengklarifikasi kebenaran hipotesis proses pengasutan.

Dengan nilai kapasitor yang tetap dan nilai tegangan awal kapasitor tidak tetap, bentuk gelombang arus picu yang dihasilkan diberikan pada Gambar 5.23 dan Gambar 5.24

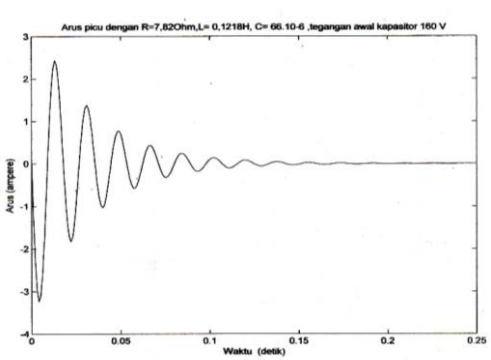


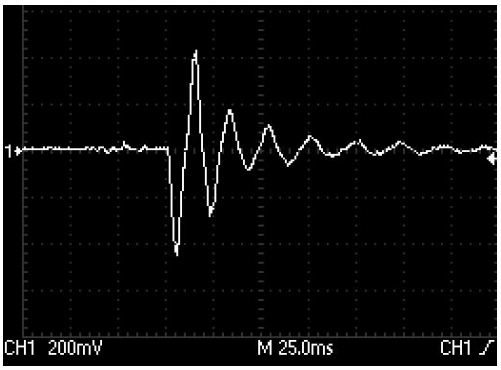
a. Gelombang arus picu hasil simulasi



b. Gelombang arus picu hasil eksperimen

Gambar 5.23: Gelombang arus picu dengan C_M =68 μF, tegangan awal kapasitor 140 V





a. Gelombang arus picu hasil simulasi b. Gelombang arus picu hasil eksperimen

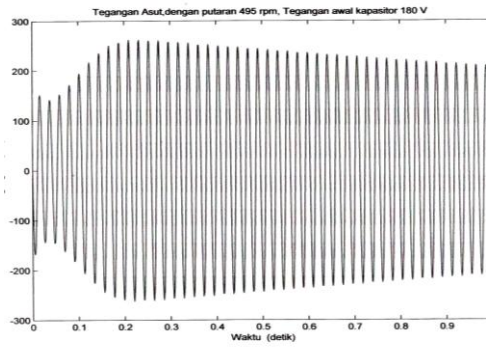
Gambar 5.24: Gelombang arus picu dengan C_M =68 μF, tegangan awal kapasitor 160 V

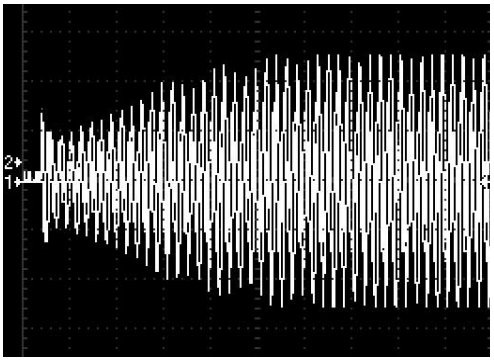
Gambar 5.23a dibandingkan dengan Gambar 5.23b, terlihat bentuk gelombang hampir sama. Begitu juga Gambar 5.24a hampir sama dengan Gambar 5.24b. Amplitudo pada Gambar 5.24b kelihatan kecil karena A/div pada oscilloscope diperbesar.

Dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan awal kapasitor tidak berpengaruh terhadap frekuensi sudut yang dibangkitkan, melainkan hanya berpengaruh pada nilai amplitudo arus picu. Frekuensi arus picu hanya ditentukan oleh nilai impedansi generator dan nilai kapasitor penguat.

5.3.2. Perbandingan gelombang tegangan hasil simulasi dengan hasil eksperimen

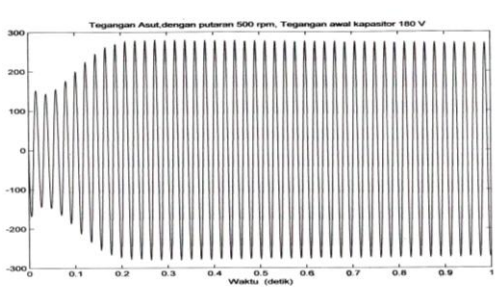
Eksperimen pengasutan dibuat putaran sekitar putaran sinkron dengan tegangan awal kapasitor penguat yang berbeda. Gelombang tegangan proses pengasutan hasil simulasi yang disandingkan dengan hasil eksperimen disajikan pada Gambar 5.25 sampai dengan Gambar 5.28.

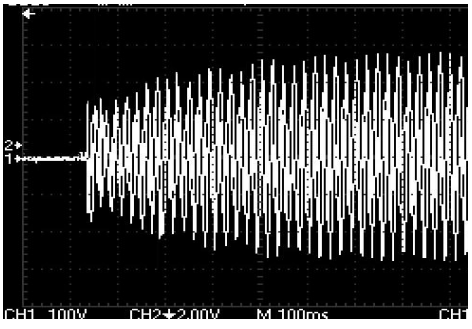




5.25a:Tegangan asut hasil simulasi 5.25b:. Tegangan asut hasil eksperimen

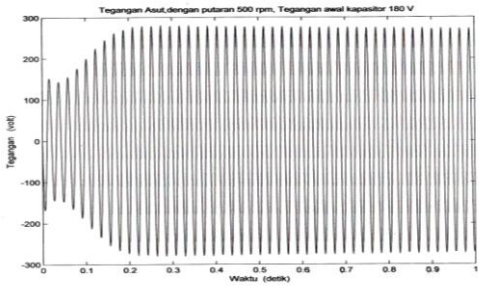
Gambar 5.25: Gelombang tegangan pengasutan putaran putaran 500 rpm, tegangan awal kapasitor 140 V.

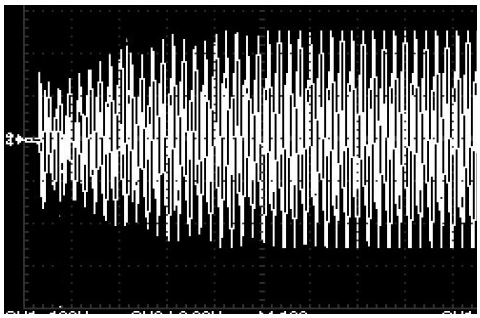




5.26a:Tegangan asut hasil simulasi 5.26b:. Tegangan asut hasil eksperimen

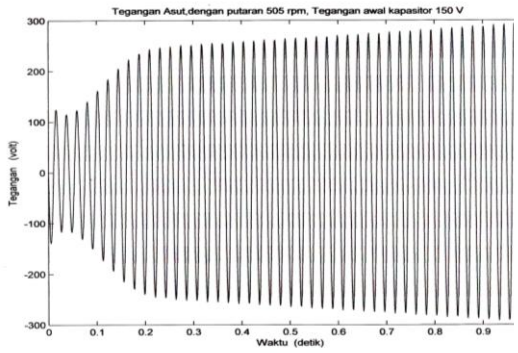
Gambar 5.26: Gelombang tegangan pengasutan, putaran 500 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V

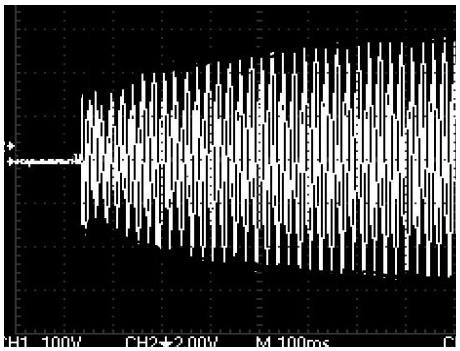




5.27a:Tegangan asut hasil simulasi 5.27b:. Tegangan asut hasil eksperimen

Gambar 5.27: Gelombang tegangan pengasutan, putaran 505 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V





5.28a:Tegangan asut hasil simulasi 5.28b:. Tegangan asut hasil eksperimen

Gambar 5.28: Gelombang tegangan pengasutan, putaran 510 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V

Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, pengasutan dengan putaran di bawah putaran sinkron (Gambar 5.25) tegangan terus menyusut menuju nol. Dengan tegangan awal kapasitor diperbesar, untuk putaran di bawah putaran sinkron pengasutan tetap tidak berhasil.

Generator yang diputar pada putaran sinkron, dengan tegangan awal yang menghasilkan arus picu awal mendekati arus generator tanpa beban, tetap terjadi penyusutan tegangan.

Pengasutan dengan putaran 1% di atas putaran sinkron (505 rpm) dengan tegangan awal kapasitor 160 V, tegangan yang dibangkitkan generator meningkat hingga mantap

tetapi belum dapat mencapai nominal. Hal ini disebabkan putaran generator yang turun sedikit di bawah putaran sinkron.

Pengasutan dengan putaran 2% di atas putaran sinkron (510 rpm) dengan tegangan awal kapasitor 160 V, tegangan yang dibangkitkan generator terus meningkat hingga dapat melebihi nilai tegangan nominal.

Nilai ambang putaran generator tanpa beban dapat ditentukan dari Persamaan (5-28). Agar tegangan generator dapat mencapai mantap, generator diputar pada kecepatan ambangnya. Nilai ambang kecepatan sudut mekanik dapat ditentukan dari pengali pangkat eksponensial suku pertama (*i*) pada Persamaan (5-28) yang disamakan dengan 0 (nol):

$$\frac{R-M\frac{d\theta}{dt}}{2L} = 0$$

$$R - M\frac{d\theta}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{R}{M} \qquad (5\text{-}35)$$

Secara teoritis, arus tanpa beban generator yang diteliti sebesar 3,73 A. Nilai arus sebesar 3,73 A ini pada Tabel 5.5 terletak antara baris 14 (I=3,5 A; M_{14}=0,1802 H) dan baris 15 (I=3,75 A; M_{15}=0,1756 H). Nilai induktansi kemagnetan M dengan arus sebesar 3,73 dihitung dengan pendekatan:

$$M = \frac{M_{14} + M_{15}}{2}\ \text{H} = \frac{0{,}1802 + 0{,}1756}{2}\ \text{H} = 0{,}1799\ \text{H}$$

dengari nilai resistansi ekuivalen R = 9,82 Ω dan induktansi kemagnetan M = 0,1779 H dimasukkan ke dalam Persamaan (5-35) diperoleh,

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{mek} = \frac{R}{M} = \frac{9{,}82}{0{,}1779} = 52{,}16\ rad/s\ .$$

Dari persamaan kecepatan sudut ω_{mek} = 2×π×n , didapat putaran ambang:

$$n = \frac{52{,}18\times 60}{2\times 3{,}14}\ \text{rpm} = 504{,}91\ \text{rpm}$$

Seperti yang terlihat pada Gambar 5.28, akibat putaran yang melebihi ambang putaran generator (510 rpm), maka tegangan generator tanpa beban terus meningkat hingga melebihi nilai nominal.

Dengan nilai kapasitor pada kumparan utama sebesar 68 μF, tegangan awal kapasitor yang menjamin keberhasilan proses pangasutan minimum sebesar 160 volt.

Energi yang tersimpan dalam kapasitor:

$$W_C = \frac{1}{2}CV^2\ \text{J} = \frac{1}{2}\times 68\times 10^{-6}\times 160^2\ \text{J} = 0{,}8704\ \text{J}$$

Induktansi kemagnetan generator dari hasil pengukuran yang tersaji pada Tabel 5.3 baris 15 kolom 7, M = 0,1034 H. Pada kondisi tanpa beban diperhitungkan arus generator Ig = 3,73 A, maka energi yang tersimpan pada kumparan generator:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \text{ J} = \frac{1}{2} \times 0{,}1034 \times 3{,}73^2 \text{ J} = 0{,}7192 \text{ J}$$

Dari perhitungan, terlihat bahwa dengan tegangan kapasitor 160 V, energi yang tersimpan dalam kapasitor lebih besar dari pada energi pada induktansi kumparan stator generator. Oleh karena itu, meskipun amplitudo awal arus picu sedikit lebih rendah dari arus generator tanpa beban, proses pengasutan dapat berhasil.