

**ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU
UNTUK MENENTUKAN PARAMETER KERJA
GENERATOR SEREMPAK**

SKRIPSI

oleh

FELIX RAFIO
04 03 03 040 3



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GASAL 2007/2008**

**ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU
UNTUK MENENTUKAN PARAMETER KERJA
GENERATOR SEREMPAK**

SKRIPSI

oleh

FELIX RAFIO
04 03 03 040 3



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GASAL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU UNTUK MENENTUKAN PARAMETER KERJA GENERATOR SEREMPAK

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 8 Januari 2008

Felix Rafio

NPM 04 03 03 040 3

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU UNTUK MENENTUKAN PARAMETER KERJA GENERATOR SEREMPAK

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 4 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 8 Januari 2008
Dosen Pembimbing

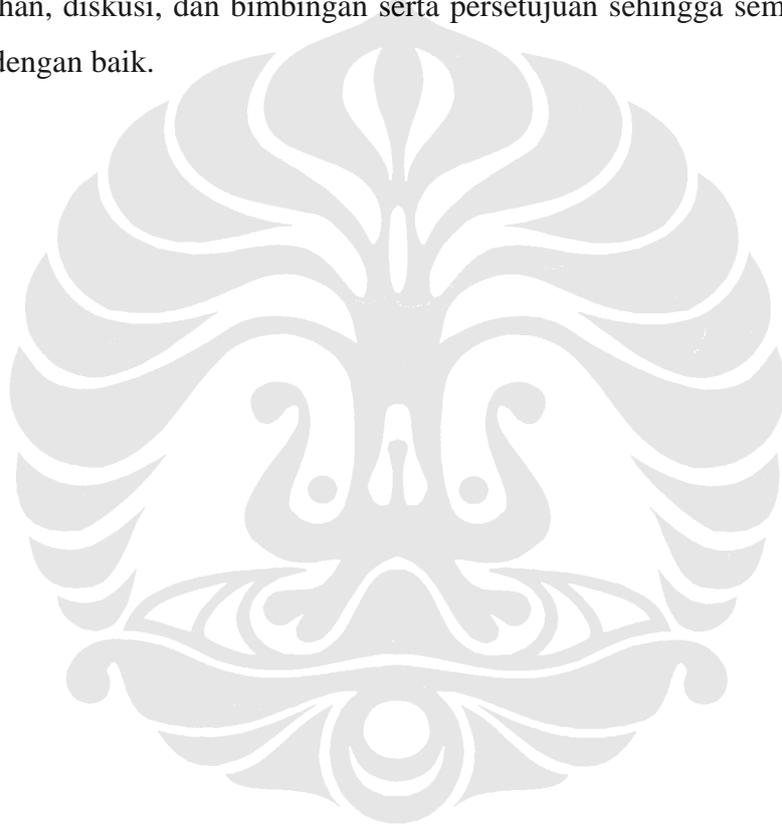
Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo
NIP 130.517.308

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga seminar ini dapat selesai dengan baik.



Felix Rafio
NPM 04 03 03 040 3
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
I. Dr.Ir. Uno Bintang Sudibyo

ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU UNTUK MENENTUKAN PARAMETER KERJA GENERATOR SEREMPAK

ABSTRAK

Suatu generator serempak dirancang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan oleh pengguna, sehingga dapat bekerja pada performa yang optimal. Penentuan parameter generator serempak ditentukan dengan uji rangkaian hubung singkat dan uji tanggapan langkah rangkaian terbuka. Namun, kedua pengujian ini tidak dapat memberikan hasil yang akurat pada model dengan orde tinggi. Pada dekade terakhir, analisis terhadap data uji tanggapan frekuensi telah terbukti menjadi alternatif bagi penentuan parameter generator serempak, terutama untuk menggantikan uji rangkaian hubung singkat dan uji tanggapan langkah rangkaian terbuka.

Skripsi ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan untuk menjalankan metode analisis ekstraksi konstanta waktu suatu generator serempak dari data uji tanggapan frekuensi. Skripsi ini berdasarkan pada nilai besaran dari uji tanggapan frekuensi untuk mengekstraksi konstanta waktu. Metode analisis memiliki tiga tahapan langkah, yang pertama adalah mengubah data impedansi menjadi data operasional, yang kedua adalah ekstraksi konstanta waktu, dan yang ketiga adalah menentukan parameter. Dengan menggunakan metode analisis pada data uji tanggapan frekuensi untuk mengekstraksi konstanta waktu dapat memberikan hasil yang akurat dari orde satu hingga orde yang tinggi.

Kata kunci : Tanggapan Frekuensi, Generator Serempak, Konstanta Waktu

Felix Rafio
NPM 04 03 03 040 3
Electrical Engineering Department

Counsellor
I. Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo

ANALYSIS OF TIME CONSTANT EXTRACTION TO DETERMINE SYNCHRONOUS GENERATOR'S PARAMETER

ABSTRACT

A synchronous generator is constructed in accordance with specifications required by the user, as to perform optimal. Synchronous generator's parameters determination is done using sudden short circuit test and open circuit step response test. But these two tests could not give accurate results on a higher order model. Over the past decade, the analysis of frequency response test data has proven to be an alternative to determine synchronous generator's parameters, especially for the traditional methods of sudden short circuit test and open circuit step response test.

This bachelor thesis shows the steps done on a proposed analytical method of extracting the time constants of a synchronous generator from frequency response test data. This thesis is based on the magnitude information of the frequency response test to extract the time constants. The analytical method has three steps, first is converting impedance data to operational data, second is time constant extraction, and third is determining parameters. Using the analytical method of frequency response test data to extract the time constants could give accurate results of first order up to higher order models.

Keywords : Frequency Response, Synchronous Generator, Time Constant

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	1
1.3 TUJUAN PENELITIAN	2
1.4 BATASAN MASALAH	2
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN	3
BAB II LANDASAN TEORI	4
2.1 GENERATOR SEREMPAK	4
2.1.1 Umum	4
2.1.2 Prinsip Kerja	5
2.1.3 Rangkaian Pengganti Tiga Fasa	7
2.1.4 Aliran Daya Pada Generator Serempak	8
2.2 PEMODELAN GENERATOR SEREMPAK	9
2.2.1 Fluks Bocor dalam Kumparan	11
2.2.2 Persamaan Tegangan pada Acuan dq0 Rotor	12
2.2.3 Persamaan Arus dari Fluks Bocor	12
2.2.4 Rangkaian Ganti Pemodelan Generator Serempak	13

2.3 METODE METODE UJI TANGGAPAN FREKUENSI UNTUK MENENTUKAN PARAMETER GENERATOR SEREMPAK	15
2.3.1 Metode Analisis	15
2.3.1.1 Rangkaian Ekuivalen	16
2.3.1.2 Induktansi Operasional	17
2.3.1.3 Ekstraksi Konstanta Waktu	19
2.3.2 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak Tanpa Iterasi	20
2.3.3 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak Orde Tinggi	21
2.3.4 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak dengan Menggunakan $X_d(p)$ dan $X_q(p)$	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 UMUM	23
3.2 KONVERSI DATA IMPEDANSI MENJADI DATA INDUKTANSI OPERASIONAL	24
3.3 EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU	25
3.3.1 Hubungan Konstanta Alpha Terhadap Kemiringan Kurva Tanggapan Frekuensi	25
3.3.2 Menentukan Nilai Frekuensi Tengah	28
3.3.3 Menentukan Nilai Alpha	29
3.3.4 Ekstraksi Nilai Konstanta Waktu	30
3.3.5 Menentukan Tanggapan Residual	31
BAB IV ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU	32
4.1 MODEL ORDE SATU	32
4.2 MODEL ORDE DUA	34
4.3 MODEL ORDE TIGA	37
4.4 MODEL ORDE EMPAT	39
4.5 ANALISIS NILAI AWAL KONSTANTA WAKTU	42
BAB V KESIMPULAN	43
DAFTAR ACUAN	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	46

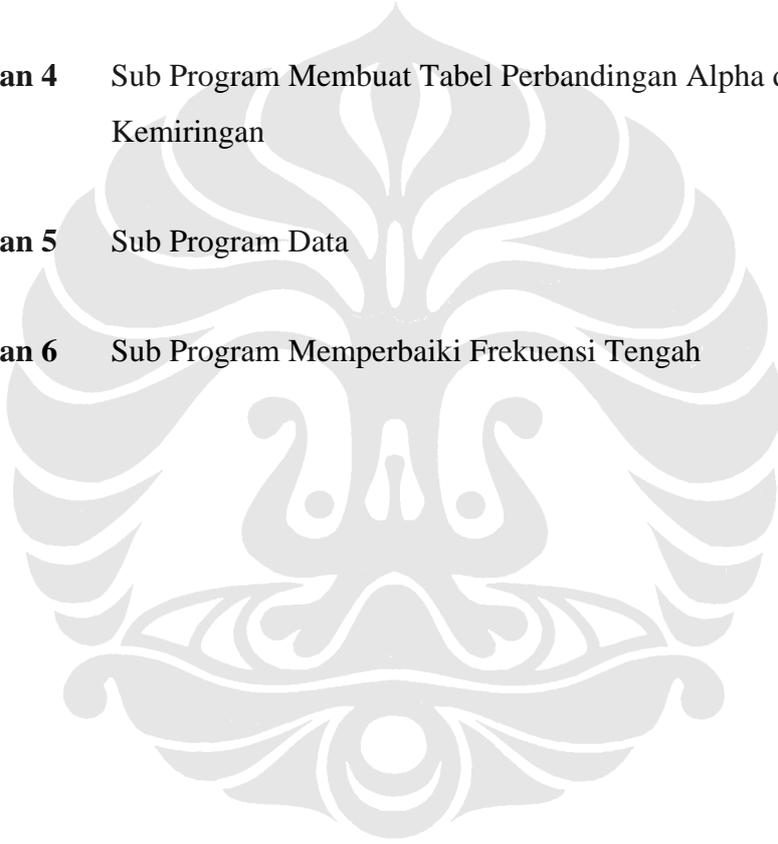
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Generator serempak (a)stator (b)rotor	4
Gambar 2.2. Tipe rotor pada generator serempak (a)tipe salien (b)tipe silinder	4
Gambar 2.3. Rangkaian pengganti generator serempak 1 fasa	5
Gambar 2.4. Rangkaian pengganti generator serempak 3 fasa	7
Gambar 2.5. Diagram aliran daya pada generator serempak	8
Gambar 2.6. Tranformasi sumbu abc menjadi dq0	9
Gambar 2.7. Rangkaian ganti mesin serempak ideal	9
Gambar 2.8. Rangkaian ganti generator serempak pada sistem dq0	14
Gambar 2.9. Hasil perhitungan dengan metode numerik	15
Gambar 2.10. Hasil perhitungan dengan metode analisis	15
Gambar 2.11. Rangkaian ekivalen model orde tiga	16
Gambar 2.12. Rangkaian ekivalen model orde dua	16
Gambar 2.13. Efek perubahan nilai resistor jangkar	17
Gambar 2.14. Data impedansi	17
Gambar 2.15. Induktansi operasional	18
Gambar 2.16. Model umum sumbu-d dan sumbu-q	20
Gambar 2.17. Model umum rangkaian ekivalen tanggapan frekuensi pada kondisi diam. (a)model sumbu langsung (b)model sumbu kuadratur	21
Gambar 3.1. Alur identifikasi parameter	23
Gambar 3.2. Diagram alir alur identifikasi parameter metode analisis	23
Gambar 3.3. Model generator serempak pada MATLAB	24
Gambar 3.4. Kurva respon induktansi operasional	24
Gambar 3.5. Diagram alir logika memasukan data generator serempak	25
Gambar 3.6. Kurva respon frekuensi tengah	26
Gambar 3.7. Perbandingan nilai α dengan kemiringan	27
Gambar 3.8. Diagram alir alpha terhadap kemiringan	28
Gambar 3.9. Diagram alir untuk menentukan frekuensi tengah	28
Gambar 3.10. Perbandingan nilai data poin dengan kemiringan	29

Gambar 3.11	Diagram alir untuk menentukan alpha	29
Gambar 3.12	Diagram alir menentukan konstanta waktu	30
Gambar 3.13	Diagram alir untuk menentukan tanggapan residual pada sistem	31
Gambar 4.1.	Nilai kemiringan model orde satu	32
Gambar 4.2.	Tanggapan frekuensi untuk model orde satu	33
Gambar 4.3.	Kurva tanggapan residual model orde satu	34
Gambar 4.4.	Kurva frekuensi tengah model orde dua	35
Gambar 4.5.	Tanggapan frekuensi untuk model orde dua	36
Gambar 4.6.	Kurva tanggapan residual model orde dua	36
Gambar 4.7.	Kurva frekuensi tengah model orde tiga	37
Gambar 4.8.	Tanggapan frekuensi untuk model orde tiga	38
Gambar 4.9.	Kurva tanggapan residual model orde tiga	39
Gambar 4.10.	Kurva frekuensi tengah model orde empat	40
Gambar 4.11.	Tanggapan frekuensi untuk model orde empat	41
Gambar 4.12.	Kurva tanggapan residual model orde empat	41
Gambar 4.13.	Perbandingan kurva besaran model orde empat dengan kurva besaran induktansi operasional	42

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Data Impedansi Generator Serempak
- Lampiran 2** Data Uji Tanggapan Frekuensi Generator Serempak
- Lampiran 3** Program Utama
- Lampiran 4** Sub Program Membuat Tabel Perbandingan Alpha dengan Kemiringan
- Lampiran 5** Sub Program Data
- Lampiran 6** Sub Program Memperbaiki Frekuensi Tengah



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
f	Frekuensi	Hertz
n	Kecepatan putar rotor	rpm
p	Jumlah kutub	
B	Medan magnet	Tesla
μ	Permeabilitas bahan penghantar	
N	Jumlah lilitan pada kumparan	
I	Arus listrik	Ampere
l	Panjang penampang	meter
Φ	Fluks magnetik	Weber
A	Luas penampang bidang	m ²
t	Waktu	second
abc	Sumbu fasa pada sistem tiga fasa	
V	Tegangan	Volt
R	Resistansi	Ohm
L	Induktansi	Henry
Z	Impedansi	Ohm
T	Konstanta waktu	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Dalam proses pembangkitan energi listrik digunakan mesin listrik yang dapat mengubah suatu bentuk energi menjadi energi listrik. Pada proses pembangkitan energi listrik, energi mekanik merupakan energi yang paling banyak diubah. Mesin listrik yang bekerja mengubah energi mekanik menjadi energi listrik disebut sebagai generator atau alternator. Berdasarkan jenis energi listrik yang ingin dihasilkan terdapat dua jenis generator yaitu generator arus searah dan generator arus bolak balik. Sedangkan berdasarkan sumber energi mekanik yang digunakan terdapat dua jenis generator arus bolak balik yaitu generator serempak dan generator induksi.

Generator induksi memiliki keunggulan yaitu sumber energi mekanik yang menjadi masukan generator tidak harus selalu bernilai konstan. Sedangkan pada generator serempak nilai energi mekanik yang menjadi masukan harus selalu konstan. Namun, pada pemakaiannya, generator serempak lebih banyak digunakan daripada generator induksi. Hal ini karena generator serempak memiliki keunggulan pada pengaturan tegangan keluaran yang lebih mudah. Agar dapat berfungsi dengan optimal, generator serempak dikonstruksikan sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Untuk dapat memenuhi kualifikasi dari spesifikasi yang diinginkan tersebut, penentuan nilai parameter kerja pada generator serempak merupakan hal yang sangat penting. Hal ini dikarenakan agar generator serempak dapat menghasilkan performa yang optimal, parameter-parameter karakteristik generator serempak harus ditentukan dengan akurat pada model dengan orde rendah hingga orde tinggi.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sebelumnya penentuan nilai parameter pada generator serempak telah dikembangkan dengan menggunakan uji rangkaian hubung singkat dan uji *step response* pada rangkaian terbuka. Namun, kedua metode pengujian ini tidak dapat

memberikan hasil yang akurat ketika digunakan untuk menentukan parameter pada generator serempak dengan model orde yang tinggi. Untuk itu dikembangkan studi mengenai metode uji tanggapan frekuensi yang merupakan metode yang diterapkan untuk menentukan parameter-parameter kerja pada generator serempak sehingga dapat diperoleh hasil yang akurat baik pada orde yang lebih rendah maupun pada orde yang lebih tinggi. Sehingga generator serempak yang dirancang dapat dikatakan telah memenuhi kualifikasi spesifikasi yang diinginkan.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian pada skripsi yang dibuat ini bertujuan untuk mempelajari metode analisis sistematis pada ekstraksi konstanta waktu dari hasil uji tanggapan frekuensi pada generator serempak untuk menentukan parameter kerja induktansi pada generator serempak.

1.4 BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini akan dibatasi hal-hal sebagai berikut:

1. Skripsi ini akan membahas langkah-langkah ekstraksi konstanta waktu dengan menggunakan metode analisis sistematis, metode lain hanya akan diuraikan secara singkat.
2. Langkah-langkah ekstraksi konstanta waktu akan dimulai dari data tanggapan frekuensi yang ada.
3. Parameter kerja generator serempak yang akan ditentukan adalah parameter impedansi yang terdiri dari resistansi dan reaktansi induktif.
4. Analisis hasil uji tanggapan frekuensi akan dikembangkan sampai orde empat yang sudah merupakan orde tinggi.
5. Variasi pengujian dilakukan pada frekuensi antara 1mHz sampai dengan 1kHz.
6. Skripsi ini menggunakan pemrograman MATLAB untuk menulis pemrograman langkah-langkah ekstraksi konstanta waktu.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan, diawali dengan melakukan studi literatur mengenai generator serempak, tanggapan frekuensi, dan pengujian-pengujian yang ada untuk menentukan parameter generator serempak. Kemudian dengan menerapkan hasil studi literatur pada pemodelan simulasi dengan menggunakan perangkat pemrograman MATLAB, dan melakukan analisa atas hasil simulasi yang diperoleh.

1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN

Penulisan skripsi yang merupakan studi literatur ini dibagi menjadi beberapa bab. Bab satu akan menguraikan latar belakang penulisan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah yang dikembangkan, metodologi penelitian dan sistematika penelitian dari skripsi ini, bab dua membahas tentang landasan teori mengenai generator serempak, pemodelan generator serempak, metode analisis sistematis ekstraksi parameter yang akan dipakai, dan beberapa metode lain untuk menentukan nilai parameter generator serempak, bab tiga berisi tentang metodologi penelitian yang menjabarkan langkah-langkah yang dikerjakan untuk tahap simulasi, bab empat akan memberikan analisis dari simulasi yang dilakukan pada penelitian ini, sedangkan bab lima akan memberikan penutup dari penulisan skripsi ini berupa kesimpulan.

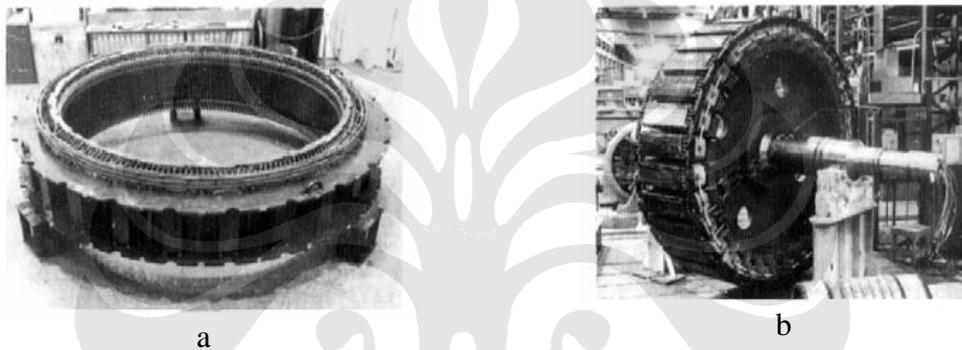
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 GENERATOR SEREMPAK

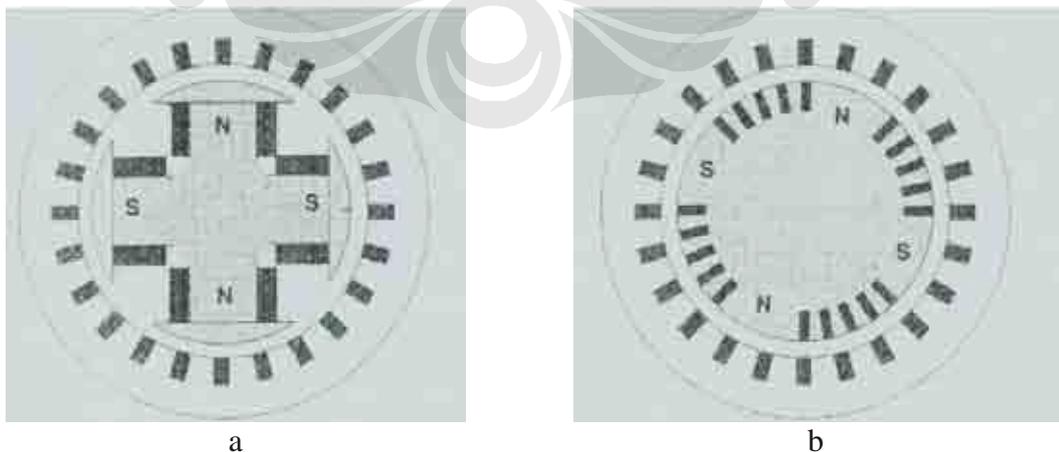
2.1.1 Umum

Generator merupakan mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetis. Suatu generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator.



Gambar 2.1. Generator serempak (a)stator (b)rotor

Rotor merupakan bagian yang berputar yang menghasilkan medan magnet. Terdapat dua jenis rotor pada generator serempak, yaitu rotor tipe salien dan rotor tipe silinder.



Gambar 2.2. Tipe rotor pada generator serempak (a)tipe salien (b)tipe silinder

Sedangkan stator merupakan bagian yang diam yang menerima induksi elektromagnetis dari rotor, menghasilkan tegangan, dan terhubung dengan sistem transmisi pada jaringan tenaga listrik.

Generator serempak dapat dikatakan serempak karena frekuensi listrik yang dihasilkan tersinkronisasi dengan kecepatan putar fisik dari rotor generator serempak.

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan f_e = frekuensi elektris yang dihasilkan

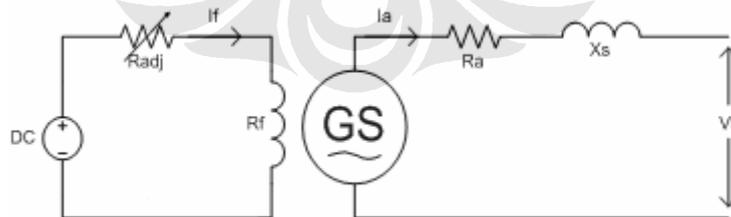
n_m = kecepatan putar rotor (kecepatan putar medan magnet)

p = jumlah kutub pada rotor

Agar dapat menghasilkan listrik dengan frekuensi yang konstan, maka masukan sumber energi mekanik yang memutar rotor generator serempak harus selalu dijaga konstan.

2.1.2 Prinsip Kerja

Generator serempak bekerja berdasarkan prinsip induksi elektro magnetis yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dengan demikian energi mekanik akan diberikan pada rotor sehingga dapat menghasilkan energi listrik pada stator. Berikut merupakan rangkaian pengganti sederhana dari generator serempak 1 fasa.



Gambar 2.3. Rangkaian pengganti generator serempak 1 fasa

Pada gambar 2.3, rotor pada generator serempak akan diberikan catu tegangan arus searah. Karena rangkaian rotor generator serempak merupakan suatu rangkaian tertutup, maka pada rotor akan mengalir arus searah yang akan melewati kumparan R_f . Berasaskan pada Hukum Oersted, ketika arus listrik

mengalir pada suatu kumparan, akan timbul medan magnet. Dengan demikian pada kumparan kawat rotor akan timbul medan magnet yang besarnya sesuai dengan persamaan:

$$B_r = \frac{\mu N_r I_r}{l} \dots\dots\dots (2.2)$$

- dengan B_r = medan magnet rotor
- μ = permeabilitas pengantar pada rotor
- N_r = jumlah lilitan kawat pada rotor
- I_r = arus searah yang mengalir pada rotor
- l = panjang penampang pengantar pada rotor

Karena kumparan kawat rotor merupakan kumparan yang menghasilkan medan magnet, maka kumparan kawat rotor pada generator serempak disebut sebagai kumparan medan.

Garis gaya medan magnet yang dihasilkan di rotor akan memotong permukaan kumparan yang ada pada stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks magnetis yang melingkupi kumparan kawat stator, berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\Phi = B_r A \cos \theta \dots\dots\dots (2.3)$$

- dengan Φ = fluks magnetik
- A = luas permukaan bidang penampang kumparan stator
- θ = sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

selanjutnya kumparan kawat stator akan disebut sebagai kumparan jangkar.

Karena pada rotor mendapatkan arus searah, maka medan magnet yang dihasilkan adalah konstan pada fungsi waktu. Dengan demikian untuk setiap periode waktunya, nilai fluks magnetis yang timbul pada stator akan juga bernilai konstan. Namun, ketika sistem generator serempak mendapatkan energi mekanik dari luar yang disebut sebagai penggerak utama, akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan jangkar.

Hal ini akan menyebabkan perubahan nilai fluks magnetik di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi, di mana:

$$e_{ind} = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.4)$$

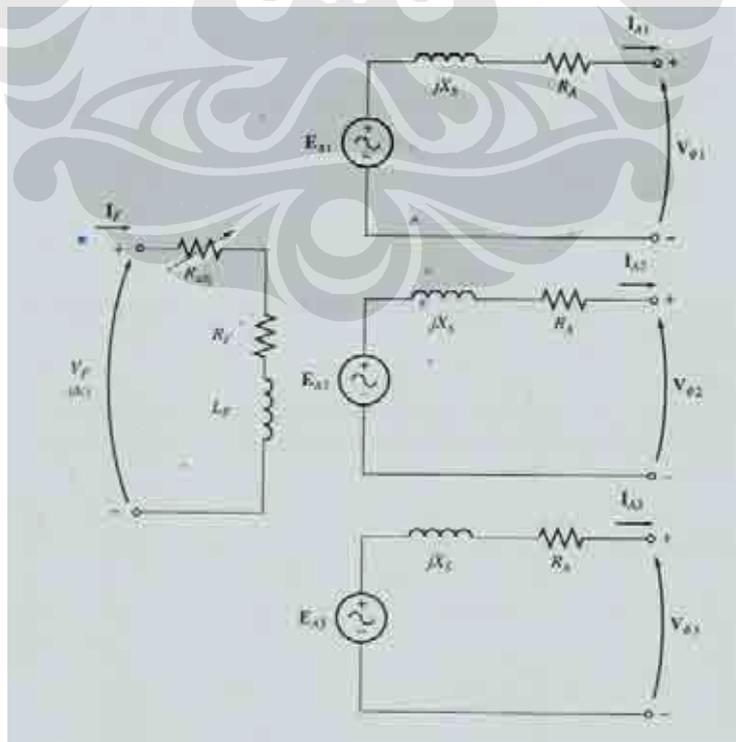
dengan e_{ind} = tegangan induksi yang dihasilkan pada stator

N_s = jumlah lilitan kawat stator

Rotor pada generator serempak tidak bisa menerima catu tegangan arus bolak balik. Hal ini karena pada tegangan arus bolak balik, medan magnet yang dihasilkan di rotor tidak akan bernilai konstan pada fungsi waktu. Sehingga akan ada perubahan fluks pada setiap waktunya. Dengan demikian tidak diperlukan adanya energi mekanik untuk menghasilkan energi listrik.

2.1.3 Rangkaian Pengganti Tiga Fasa

Ketika generator serempak dihubungkan dengan suatu sistem, maka pada rangkaian stator akan mengalir arus induksi yang merupakan arus bolak balik. Dengan adanya arus bolak balik dengan frekuensi f_c maka pada sistem generator akan memiliki nilai reaktansi induktif.



Gambar 2.4. Rangkaian pengganti generator serempak 3 fasa

Reaktansi induktif dengan hambatan stator akan memberikan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal yang dikirimkan ke sistem. Sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$V_i = e_{ind} - I_a(R_a + jX_s) \dots\dots\dots (2.5)$$

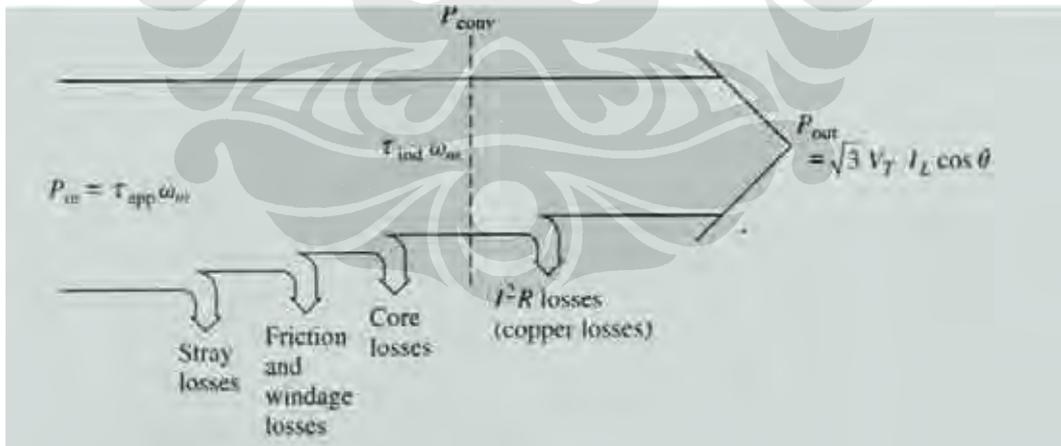
- dengan V_t = tegangan terminal yang disuplai generator serempak pada beban
- I_a = arus yang mengalir pada stator
- R_a = hambatan dalam kawat penghantar stator
- X_s = reaktansi induktif pada stator

2.1.4 Aliran Daya Pada Generator Serempak

Dengan adanya resistansi dan reaktansi induktif maka pada generator serempak dari daya mekanik yang diberikan hingga menjadi daya listrik pada terminal, akan mengalami penurunan-penurunan yang antara lain disebabkan oleh:

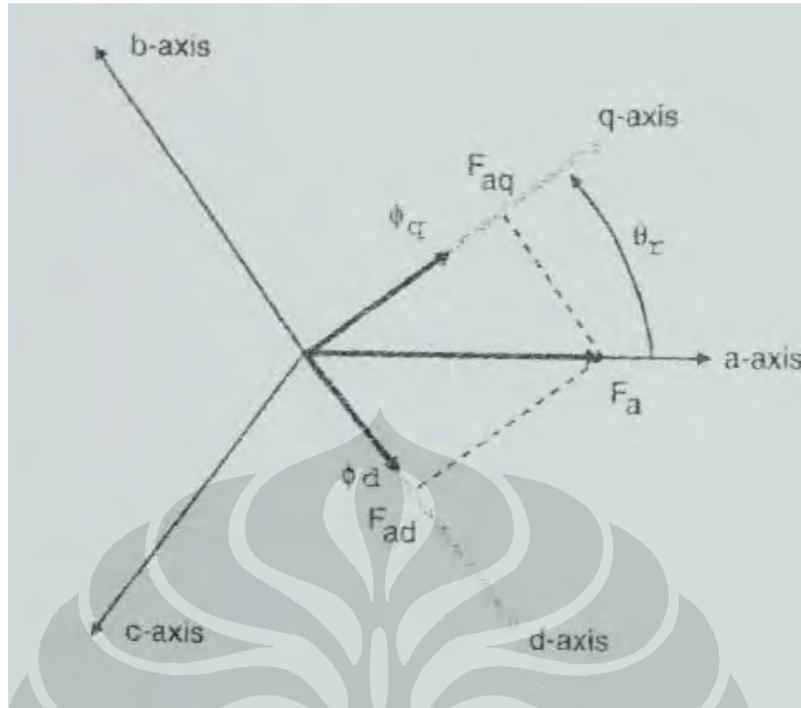
- ❖ Daya gesekan dengan angin pada perputaran rotor
- ❖ Panas pada inti besi rotor akibat arus pusar
- ❖ Rugi listrik karena adanya resistansi dan reaktansi induktif pada stator

yang digambarkan seperti pada gambar di bawah ini.



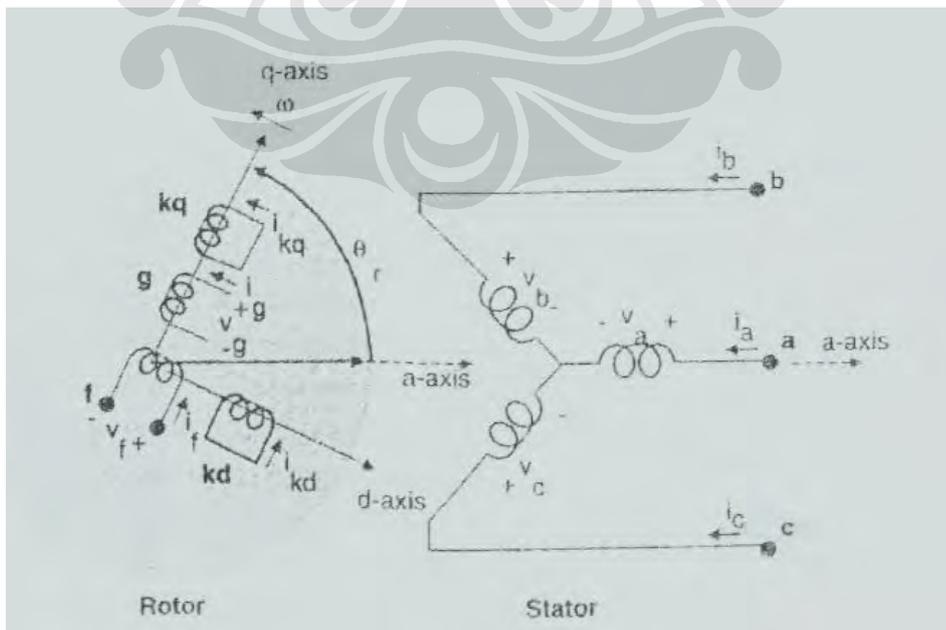
Gambar 2.5. Diagram aliran daya pada generator serempak

2.2 PEMODELAN GENERATOR SEREMPAK [1]



Gambar 2.6. Tranformasi sumbu abc menjadi dq0

Untuk memudahkan simulasi dari generator serempak, maka perlu dibuat pemodelan dari generator serempak dengan mentransformasikan sumbu abc pada generator serempak menjadi sistem sumbu langsung (*direct*), kuadratur (*quadrature*), dan nol.



Gambar 2.7. Rangkaian ganti mesin serempak ideal

Dengan menggunakan konvensi motor, tegangan pada tujuh kumparan pada gambar 2.7 adalah seimbang dengan jatuh tegangan resistif. Sehingga persamaan tegangan pada kumparan stator dan rotor dapat disusun menjadi:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta_s \\ \Delta_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{dengan } V_s &= [V_a, V_b, V_c]^T \\ V_r &= [V_f, V_{kd}, V_g, V_{kq}]^T \\ I_s &= [I_a, I_b, I_c]^T \\ I_r &= [I_f, I_{kd}, I_g, I_{kq}]^T \\ R_s &= \text{diag } [R_a, R_b, R_c] \\ R_r &= \text{diag } [R_f, R_{kd}, R_g, R_{kq}] \\ \Delta_s &= [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c]^T \\ \Delta_r &= [\lambda_f, \lambda_{kd}, \lambda_g, \lambda_{kq}]^T \end{aligned}$$

di mana simbol dari parameter tiap fasanya adalah sebagai berikut:

- R_s resistansi kumparan jangkar
- R_f resistansi kumparan medan sumbu langsung
- R_g resistansi kumparan medan sumbu kuadratur
- R_{kd} resistansi kumparan tambahan sumbu langsung
- R_{kq} resistansi kumparan tambahan sumbu kuadratur
- L_{ls} induktansi bocor kumparan jangkar
- L_{lf} induktansi bocor kumparan medan sumbu langsung
- L_{lg} induktansi bocor kumparan medan sumbu kuadratur
- L_{lkd} induktansi bocor kumparan tambahan sumbu langsung
- L_{lkq} induktansi bocor kumparan tambahan sumbu kuadratur
- L_{md} induktansi magnetis sumbu langsung stator
- L_{mq} induktansi magnetis sumbu kuadratur stator
- L_{mf} induktansi magnetis kumparan medan sumbu langsung
- L_{mg} induktansi magnetis kumparan medan sumbu kuadratur
- L_{mkd} induktansi magnetis kumparan tambahan sumbu langsung
- L_{mkq} induktansi magnetis kumparan tambahan sumbu kuadratur

Dengan demikian fluks bocor pada kumparan stator dan rotor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta_s &= L_{ss}I_s + L_{sr}I_r \\ \Delta_r &= [L_{sr}]^T I_s + L_{rr}I_r \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{fkd} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkq} \\ 0 & 0 & L_{gkq} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sg} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Persamaan L_{ss} dan L_{sr} di atas menunjukkan bahwa L_{ss} dan L_{sr} merupakan fungsi dari sudut rotor yang berubah tiap waktu sesuai dengan kecepatan perputaran rotor.

2.2.1 Fluks Bocor dalam Kumparan

Untuk fluks bocor pada stator dengan dq0 dengan menghilangkan komponen sudut perputaran rotor, akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_q &= \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_0 - L_{ms})\}I_q + L_{sg}I_g + L_{skq}I_{kq} \\ \lambda_d &= \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_0 + L_{ms})\}I_d + L_{sfd}I_f + L_{skd}I_{kd} \quad \dots\dots\dots (2.8) \\ \lambda_0 &= L_{ls}I_0 \end{aligned}$$

Dengan mengacu pada sumbu dq rotor, variabel kumparan rotor tidak akan memerlukan transformasi rotasi. Maka fluks bocor dari kumparan rotor akan menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\lambda_f &= \frac{3}{2} L_{sf} I_d + L_{ff} I_f + L_{fkd} I_{kd} \\
\lambda_{kd} &= \frac{3}{2} L_{skd} I_d + L_{fkd} I_f + L_{kdkd} I_{kd} \\
\lambda_g &= \frac{3}{2} L_{sg} I_q + L_{gg} I_g + L_{gkq} I_{kq} \\
\lambda_{kq} &= \frac{3}{2} L_{skq} I_q + L_{gkq} I_g + L_{kqkq} I_{kq}
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

2.2.2 Persamaan Tegangan pada Acuan dq0 Rotor

Dengan mereferensikan rotor pada stator dengan menggunakan perbandingan lilitan seperti halnya pada transformator, maka akan diperoleh nilai dari induktansi sinkron untuk sumbu langsung maupun sumbu kuadratur sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
L_d &= L_{md} + L_{ls} \\
L_q &= L_{mq} + L_{ls}
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Dan dengan mereferensikan parameter-parameter rotor pada stator, maka akan didapatkan persamaan tegangan pada sumbu dq0 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_q &= R_s I_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta_r}{dt} \\
V_d &= R_s I_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta_r}{dt} \\
V_0 &= R_s I_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

dengan

$$\begin{aligned}
\lambda_q &= L_q I_q + L_{mq} I'_g + L_{mq} I'_{kq} \\
\lambda_d &= L_d I_d + L_{md} I'_f + L_{md} I'_{kd} \\
\lambda_0 &= L_{ls} I_0
\end{aligned}$$

2.2.3 Persamaan Arus dari Fluks Bocor

Pada sumbu langsung dan sumbu kuadratur pemodelan generator serempak akan diperoleh persamaan arus adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{1}{L_{ls}}(\lambda_q - \lambda_{mq}) \\ I_d &= \frac{1}{L_{ls}}(\lambda_d - \lambda_{md}) \end{aligned} \dots\dots\dots (2.12)$$

Sedangkan arus pada kumparan-kumparan rotor akan diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

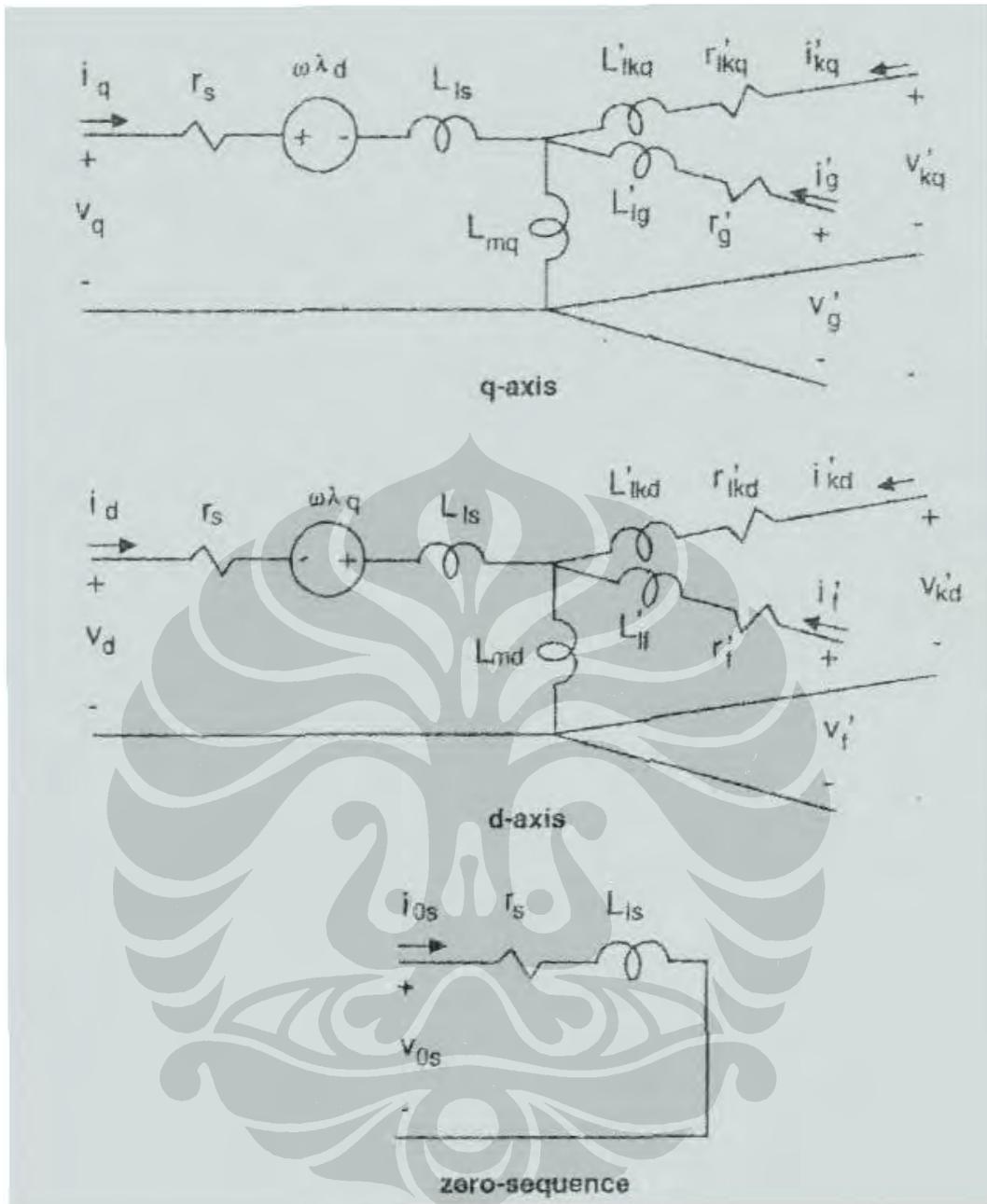
$$\begin{aligned} I'_g &= \frac{1}{L'_{lg}}(\lambda'_g - \lambda_{mq}) \\ I'_f &= \frac{1}{L'_{lf}}(\lambda'_f - \lambda_{md}) \\ I'_{kq} &= \frac{1}{L'_{lkq}}(\lambda'_{kq} - \lambda_{mq}) \\ I'_{kd} &= \frac{1}{L'_{lkd}}(\lambda'_{kd} - \lambda_{md}) \end{aligned} \dots\dots\dots (2.13)$$

Sehingga akan didapatkan nilai arus keseluruhan untuk pemodelan generator serempak sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I'_f \\ I'_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \frac{L_{md}}{L_{ls}}) \frac{1}{L_{ls}} & -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lkd}} \\ -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & (1 - \frac{L_{md}}{L'_{lf}}) \frac{1}{L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L'_{lkd}L'_{lf}} \\ -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L'_{lkd}L'_{lf}} & (1 - \frac{L_{md}}{L'_{lkd}}) \frac{1}{L'_{lkd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda'_f \\ \lambda'_{kd} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.14)$$

2.2.4 Rangkaian Ganti Pemodelan Generator Serempak

Dengan memperoleh nilai induktansi, tegangan, dan arus generator serempak pada sistem dq0, maka akan dapat ditentukan rangkaian ganti generator serempak pada sistem dq0.



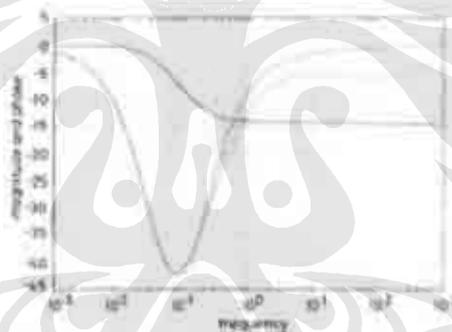
Gambar 2.8. Rangkaian ganti generator serempak pada sistem dq0

2.3 METODE METODE UJI TANGGAPAN FREKUENSI UNTUK MENENTUKAN PARAMETER GENERATOR SEREMPAK

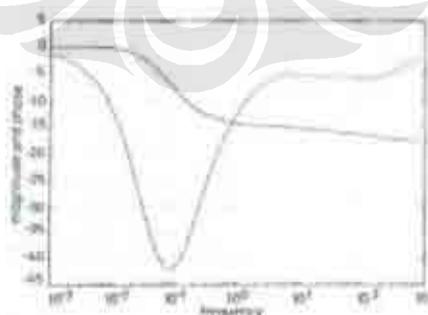
Sejak metode uji tanggapan frekuensi digunakan sebagai metode pengujian untuk menentukan parameter generator serempak, untuk mengekstraksi konstanta waktu digunakan berbagai metode. Berikut akan secara singkat digambarkan metode-metode yang ada dengan fokus pada metode analisis yang akan digunakan pada skripsi ini.

2.3.1 Metode Analisis [2]

Metode ini dikembangkan berdasarkan analisis untuk mengidentifikasi parameter generator serempak. Dibandingkan dengan metode numerik, metode analisis memiliki hasil yang lebih akurat. Hal ini karena pada metode numerik terdapat kesulitan untuk menentukan orde model sebelum dilakukan analisis.



Gambar 2.9. Hasil perhitungan dengan metode numerik

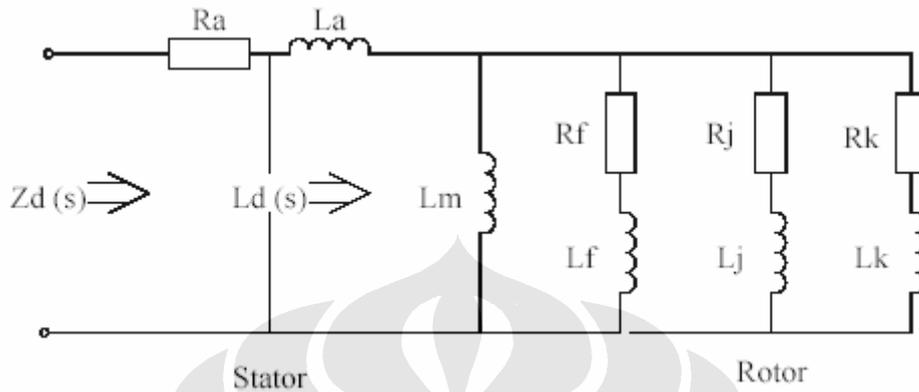


Gambar 2.10. Hasil perhitungan dengan metode analisis

Berbeda dengan metode numerik yang mengesampingkan informasi fasa dan besaran, fokus dari metode ini adalah untuk menetapkan informasi besaran

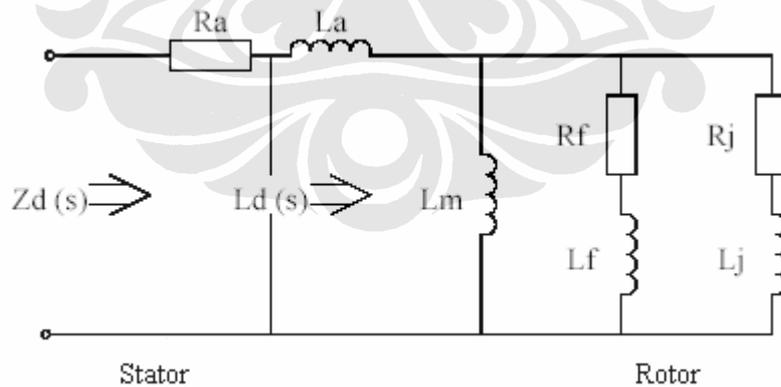
sebagai basis utama untuk menentukan fungsi alih generator. Dengan demikian akan dapat diketahui nilai konstanta waktu.

2.3.1.1 Rangkaian Ekuivalen



Gambar 2.11. Rangkaian ekuivalen model orde tiga

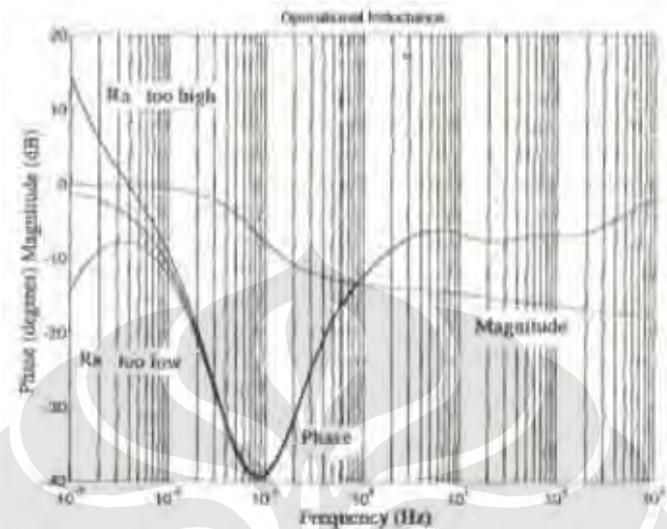
Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian ekuivalen untuk sumbu langsung model orde 3. Rangkaian ekuivalen ini terdiri dari resistor dan induktor. R_f dan L_f melambangkan kumparan medan hubung singkat. Kumparan tambahan dan arus pusar pada rotor dilambangkan dengan j dan k pada rangkaian ekuivalen. Untuk model orde dua rangkaian ekuivalen dapat dilambangkan dengan beban j dan f saja seperti yang terlihat dibawah ini



Gambar 2.12. Rangkaian ekuivalen model orde dua

Sedangkan untuk model dengan orde yang lebih tinggi dibutuhkan tambahan rangkaian paralel pada sisi rotor.

Dalam keadaan ideal, R_a adalah bagian nyata dari impedansi pada kondisi frekuensi rendah. Namun nilai R_a pada kondisi arus searah dan proses harus diubah untuk mendapatkan nilai R_a yang sebenarnya. Pada uji tanggapan frekuensi, nilai resistansi jangkar sangat mempengaruhi nilai fasa.

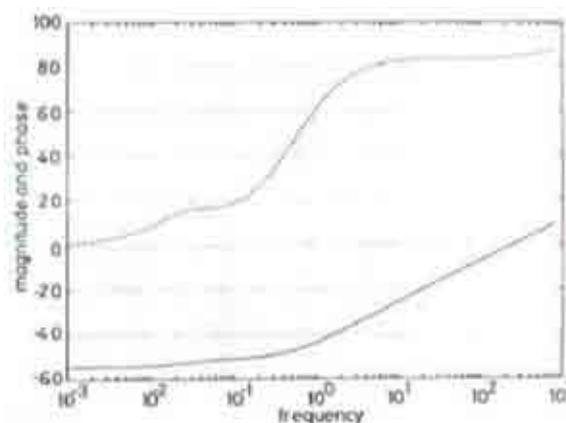


Gambar 2.13. Efek perubahan nilai resistor jangkar

Dari gambar di atas, terlihat perubahan frekuensi yang mengubah nilai R_a akan sangat berpengaruh pada nilai fasa walaupun perubahan yang dilakukan hanya 0.4%.

2.3.1.2 Induktansi Operasional

Langkah pertama adalah menentukan induktansi operasional $L_d(s)$. Induktansi operasional dapat ditentukan dari hasil pengukuran data impedansi $Z_d(s)$ yang diukur pada terminal stator.

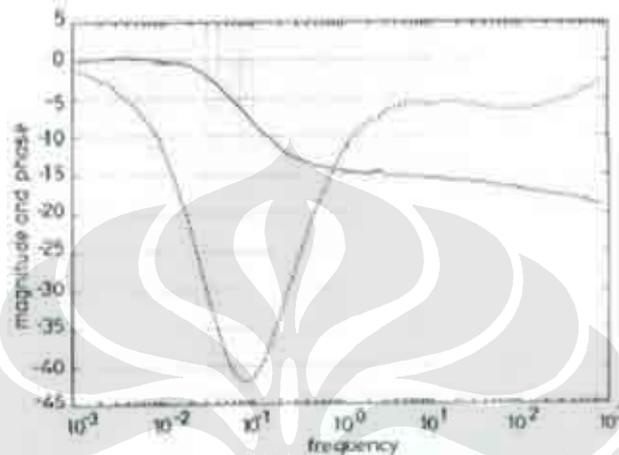


Gambar 2.14. Data impedansi

Dengan membagi nilai impedansi pada gambar 2.14 dengan $j\omega$ akan diperoleh nilai $Ld(s)$ berdasarkan persamaan:

$$Ld(s) = \frac{Zd(s) - Ra}{s} \dots\dots\dots(2.15)$$

Sehingga akan diperoleh induktansi operasional sebagai berikut:



Gambar 2.15. Induktansi operasional

Ketika generator bergetar dalam medan magnet yang berputar, rotor akan mengalami perubahan medan magnet. Untuk itu setiap arus induksi yang mengalir ke rotor harus dilambangkan di rangkaian ekuivalen. Fungsi alih untuk induktansi operasional pada orde tiga ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$Ld(s) = Ld \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)(1 + sT_5)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)(1 + sT_6)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Untuk model yang lebih kompleks, akan ada penambahan rangkaian paralel pada sisi rotor, sehingga analisis akan menjadi semakin sulit. Penentuan tambahan konstanta waktu adalah dengan menambahkan sepasang *pole* dan *zero*. Hal ini mengakibatkan pada orde empat akan ada penambahan konstanta waktu T_7 dan T_8 pada persamaan 2.16..

2.3.1.3 Ekstraksi Konstanta Waktu

Karena rangkaian ekuivalen selalu adalah kombinasi dari resisitor dan induktor dengan setiap cabang R-L terhubung paralel, ketika melambangkan domain frekuensi kompleks, cabang ini akan membentuk pasangan-pasangan *pole* dan *zero*. Setiap pasangan *pole* dan *zero* yang konstanta waktu *pole*-nya lebih besar dari konstanta waktu *zero*-nya dengan factor α menghasilkan fungsi orde satu yang tertinggal.

Fasa maksimum induktansi operasional dapat digunakan untuk menentukan α dan juga frekuensi tengah. Nilai fasa maksimum tertinggal pada pasangan *pole* dan *zero* adalah:

$$\sin \varphi = \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 1)} \dots\dots\dots (2.17)$$

sedangkan penguatan dengan adanya pasangan *pole* dan *zero* adalah:

$$GainChange(dB) = -20 \log \alpha \dots\dots\dots (2.18)$$

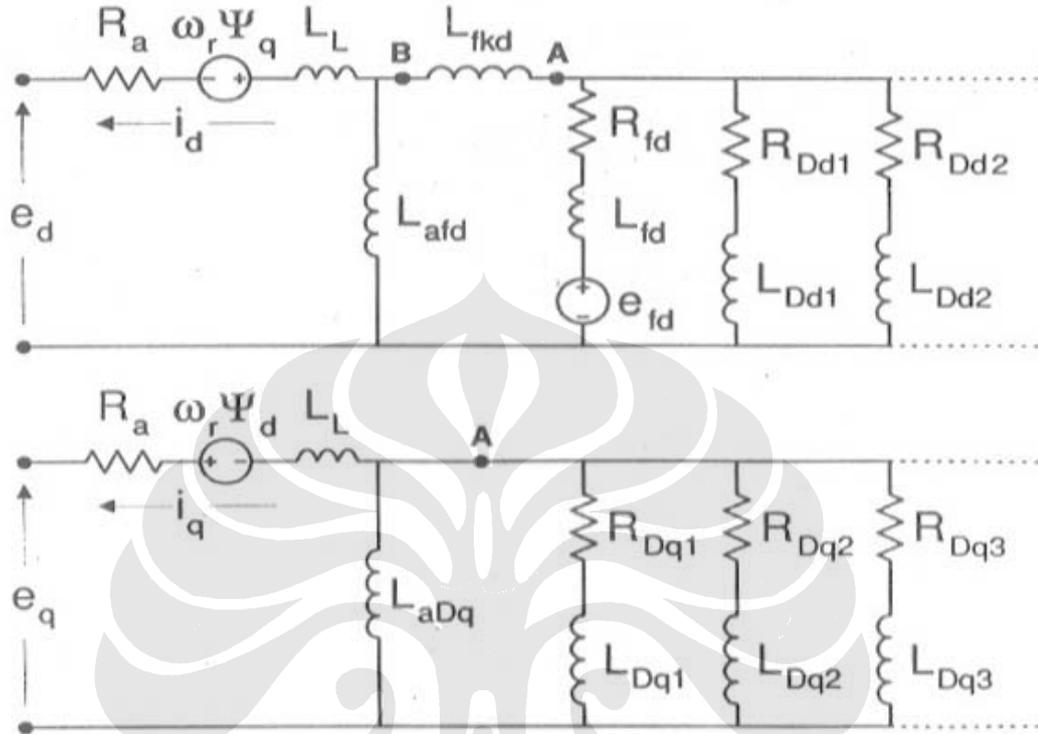
dengan demikian akan didapatkan konstanta waktu untuk *pole* (T_p) dan *zero* (T_z) sebagai berikut:

$$T_p = \frac{\sqrt{\alpha}}{2\pi F_c} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$T_z = \frac{T_p}{\alpha} \dots\dots\dots (2.20)$$

2.3.2 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak Tanpa Iterasi [3]

Metode ini dipakai untuk mengidentifikasi parameter sehingga dapat memperkirakan parameter generator tanpa melakukan iterasi.



Gambar 2.16. Model umum sumbu-d dan sumbu-q

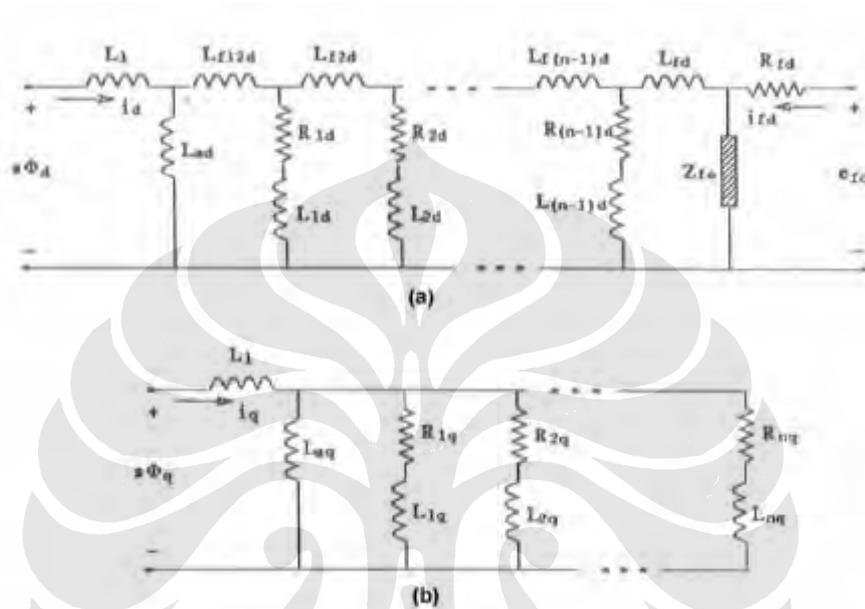
Banyaknya rangkaian rotor pada sisi kanan titik A pada gambar 2.11 tergantung pada data tanggapan frekuensi. Resistansi jangkar R_a digunakan sebagai bagian dari proses untuk mendapatkan induktansi operasional $L_d(s)$ dan $L_q(s)$. Kedua induktansi operasional pada sumbu langsung maupun pada sumbu kuadratur dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$L_d(s) \equiv \frac{\Delta\psi_d}{\Delta i_d} = \frac{1}{s} \left(\frac{\Delta e_d}{-\Delta i_d} - R_a \right) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$L_q(s) \equiv \frac{\Delta\psi_q}{\Delta i_q} = \frac{1}{s} \left(\frac{\Delta e_q}{-\Delta i_q} - R_a \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

2.3.3 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak Orde Tinggi [4]

Metode ini mengembangkan batas maksimum sumbu langsung untuk memperkirakan model generator serempak berdasarkan data uji tanggapan frekuensi pada kondisi diam. Perkiraan berdasarkan sumbu langsung dari dua generator yang berbeda untuk mengidentifikasi fungsi alih orde tinggi dan model rangkaian.



Gambar 2.17. Model umum rangkaian ekivalen tanggapan frekuensi pada kondisi diam. (a)model sumbu langsung (b)model sumbu kuadratur

Model generator serempak dari induktansi operasional dan fungsi alih pada kondisi rangkaian terbuka dan rangkaian hubung singkat dapat diperoleh dari gambar 2.13. Resistansi jangkar (R_a) menjadi bagian dari hubungan fluks. Fluks pada sumbu langsung dan sumbu kuadratur diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\Phi_d = \frac{V_d - R_a I_d}{s} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\Phi_q = \frac{V_q - R_a i_q}{s} \dots\dots\dots (2.22)$$

Pada umumnya terdapat dua fungsi alih yang berbeda karena pengaruh arus pusar non linier pada kondisi rangkaian hubung singkat dan rangkaian terbuka.

2.3.4 Metode Identifikasi Parameter Generator Serempak dengan Menggunakan $X_d(p)$ dan $X_q(p)$ [5]

Metode ini digunakan untuk menentukan nilai karakteristik dan model parameter dari tanggapan frekuensi yang diperoleh $X_d(js)$ dan $X_q(js)$. Metode ini menggunakan variasi model nilai parameter yang telah ditetapkan dengan menggunakan simulasi program dan membandingkannya dengan nilai pengukuran.

Keadaan mesin dijelaskan dengan operator reaktansi $X_d(p)$ dan $X_q(p)$ seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$X_d(p) = X_d \frac{(1 + pT'_{d'}) (1 + pT''_{d'}) \dots}{(1 + pT'_{do}) (1 + pT''_{do}) \dots} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$X_q(p) = X_q \frac{(1 + pT'_{q'}) (1 + pT''_{q'}) \dots}{(1 + pT'_{qo}) (1 + pT''_{qo}) \dots} \dots \dots \dots (2.24)$$

Metode ini memberikan hasil yang lebih akurat pada orde yang tinggi, sedangkan pada model orde tiga, apabila tidak berlangsung pada kondisi ideal (terdapat slip yang kecil) tidak akan mendapatkan hasil seakurat pada orde yang lebih tinggi. Hal ini karena konstanta waktu yang besar ketika dengan sangat lambat mengurangi arus pular.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

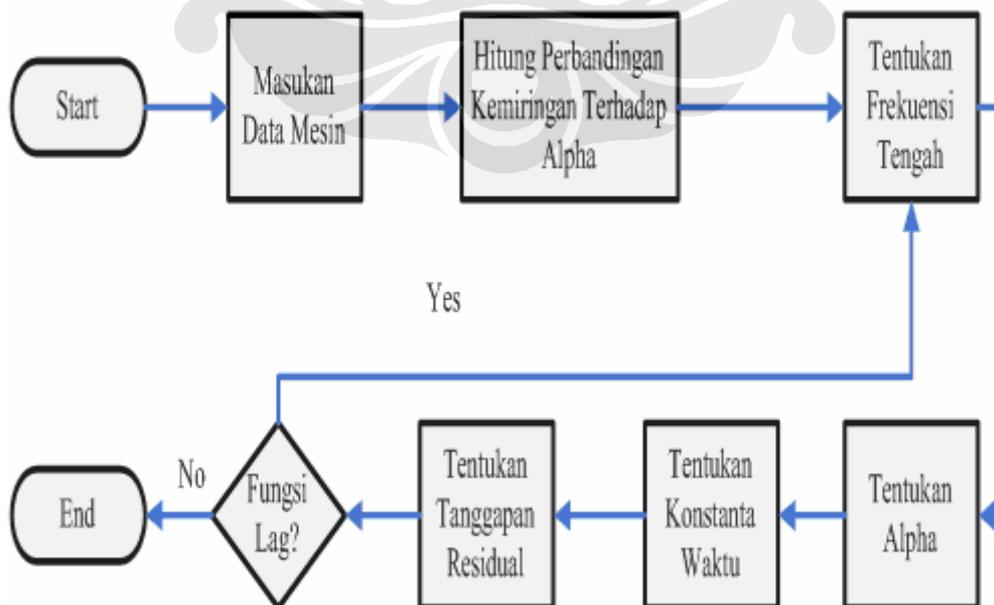
3.1 UMUM

Konsep penentuan parameter kerja induktansi generator serempak dengan ekstraksi konstanta waktu menggunakan metode pendekatan analisis sistematis terhadap pencocokan kurva diagram Bode, secara garis besar memiliki tiga tahapan alur identifikasi parameter. Tahapan-tahapan yang dibutuhkan yaitu mengubah data impedansi mesin menjadi data induktansi operasional, ekstraksi konstanta waktu dari nilai induktansi operasional, dan menentukan tanggapan residual dari sistem.



Gambar 3.1. Alur identifikasi parameter

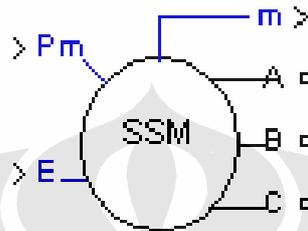
Secara keseluruhan tiga tahapan alur identifikasi parameter yang dilakukan akan terlihat dari diagram alir dibawah ini:



Gambar 3.2. Diagram alir alur identifikasi parameter metode analisis

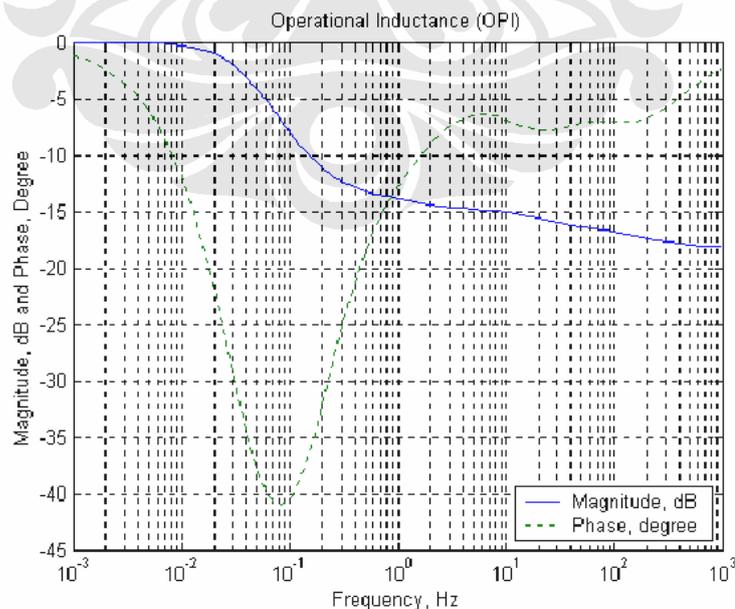
3.2 KONVERSI DATA IMPEDANSI MENJADI DATA INDUKTANSI OPERASIONAL

Untuk menentukan parameter generator serempak, diperlukan data uji tanggapan frekuensi dari generator serempak pada kondisi diam. Dengan model generator serempak pada MATLAB 7.0.4 seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.3. Model generator serempak pada MATLAB

Dari uji tanggapan frekuensi pada model generator tersebut akan didapatkan data besaran dan sudut dari impedansi. Dan dengan pemrograman MATLAB yang diberikan pada lampiran 2, akan diperoleh kurva induktansi operasional. Gambar berikut di bawah ini menunjukkan kurva induktansi operasional pada sumbu langsung yang didapatkan dari uji tanggapan frekuensi:



Gambar 3.4. Kurva respon induktansi operasional

Dari data pengujian, variasi nilai sudut fasa sumbu langsung, $Z_d(p)$, dan variasi induktansi operasional sumbu kuadratur, $Z_q(p)$, dengan mendapatkan frekuensi sumber dan variasi dari fungsi alih antara fluks jangkar sumbu langsung dan tegangan medan dengan frekuensi. Variasi ini dapat digunakan untuk mendapatkan bermacam parameter dari generator serempak. Namun, parameter yang didapatkan pada uji tanggapan frekuensi kondisi diam tidak dapat mewakili parameter pada kondisi saturasi yang sebenarnya, karena aliran arus medan yang besar harus dihindari untuk mencegah pemanasan berlebih pada kumparan medan.

3.3 EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU

Dengan data induktansi operasional yang diperoleh dari konversi data impedansi, maka dengan menggunakan metode analisis sistematis akan dapat ditentukan nilai konstanta waktu *pole* (T_p) dan konstanta waktu *zero* (T_z) dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20.

3.3.1 Hubungan Konstanta Alpha Terhadap Kemiringan Kurva Tanggapan Frekuensi

Kurva tanggapan induktansi operasional yang ditunjukkan pada gambar 3.4 menunjukkan bahwa kurva tanggapan besaran memiliki kemiringan yang berbeda pada frekuensi yang berbeda pula. Dengan adanya hal ini maka untuk menentukan konstanta waktu, diperlukan hubungan antara kemiringan dengan nilai alpha.

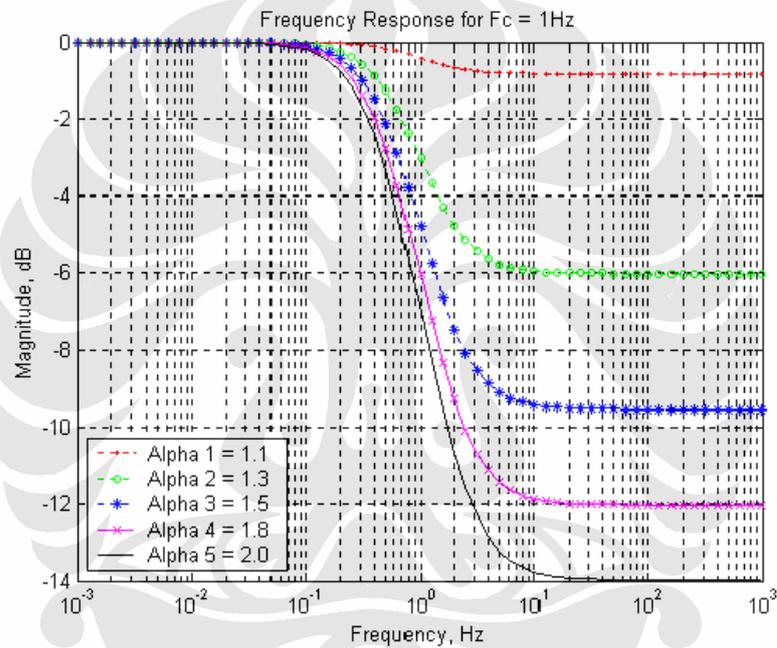


Gambar 3.5 Diagram alir logika memasukan data generator serempak

Konstanta alpha adalah konstanta tanggapan frekuensi yang didefinisikan dari fasa tanggapan frekuensi dengan menggunakan persamaan 2.17 sehingga dapat diperoleh nilai konstanta alpha adalah

$$\alpha = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \dots\dots\dots (3.1)$$

Untuk menentukan nilai α dari kurva besaran pada gambar 3.4. diperlukan nilai dari kemiringan kurva yang dipengaruhi oleh perubahan nilai α . Dengan demikian apabila nilai kemiringan kurva diketahui, akan dapat diperoleh nilai dari α . Hubungan ini dapat ditentukan dengan menetapkan nilai frekuensi tengah pada 1 Hz dan mengubah-ubah nilai α . Dengan demikian akan didapatkan jarak perubahan α dalam model orde satu seperti pada gambar berikut ini.

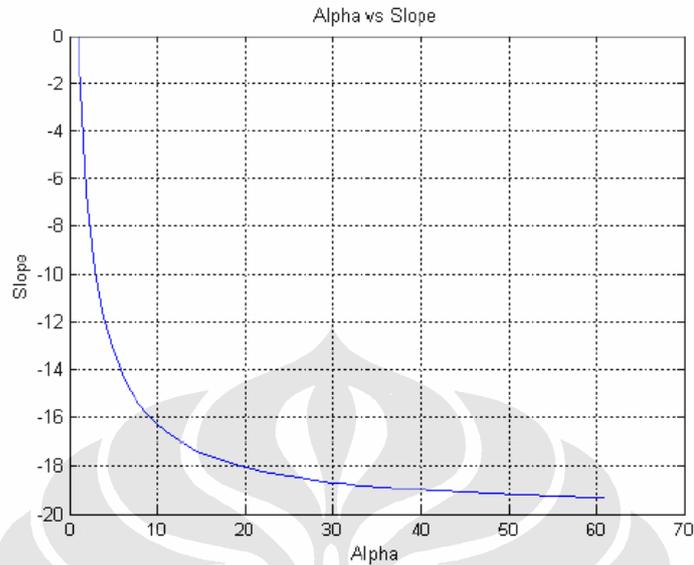


Gambar 3.6. Kurva respon frekuensi tengah

Sedangkan nilai dari kemiringan kurva dapat diperoleh dengan perbandingan antara kurva-kurva nilai α dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$kemiringan = \frac{\Delta magnitud}{\Delta frekuensi} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dan dengan membandingkan nilai kemiringan dengan α akan diperoleh kurva sebagai berikut

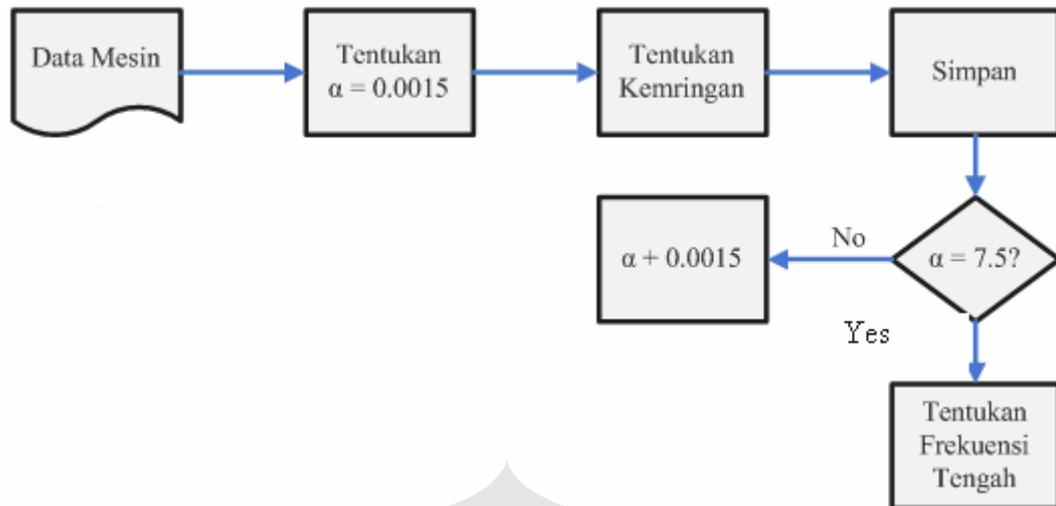


Gambar 3.7. Perbandingan nilai α dengan kemiringan

Dari gambar 3.7, dengan menggunakan MATLAB dapat dibentuk persamaan polinomial orde 10 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Gradient} = & 1.4176 \times 10^{-13} \alpha^{10} - 4.7019 \times 10^{-11} \alpha^9 + 6.7446 \times 10^{-9} \alpha^8 - \\ & 5.4816 \times 10^{-7} \alpha^7 + 2.7789 \times 10^{-5} \alpha^6 - 0.0009121 \alpha^5 + \\ & 0.019497 \alpha^4 - 0.26669 \alpha^3 + 2.2435 \alpha^2 - 10.91 \alpha + 8.6266 \end{aligned} \quad \dots (3.3)$$

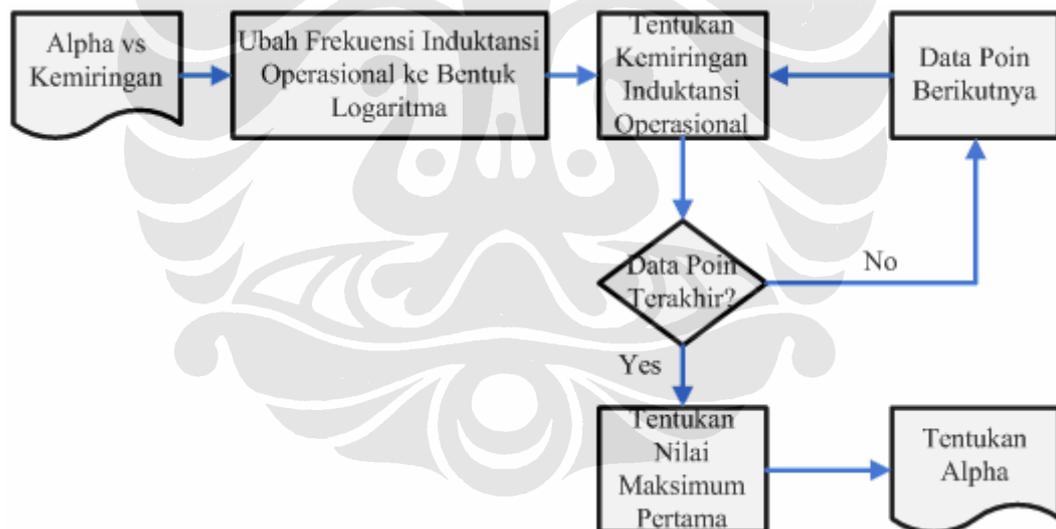
Dengan menggunakan persamaan 3.3 di atas, maka dengan logika diagram alir pada gambar 3.9 akan diperoleh nilai alpha terhadap kemiringan untuk setiap selisih nilai alpha sebesar 0.0015. Selanjutnya akan ditentukan nilai dari frekuensi tengah kurva magnitud.



Gambar 3.8 Diagram alir alpha terhadap kemiringan

3.3.2 Menentukan Nilai Frekuensi Tengah

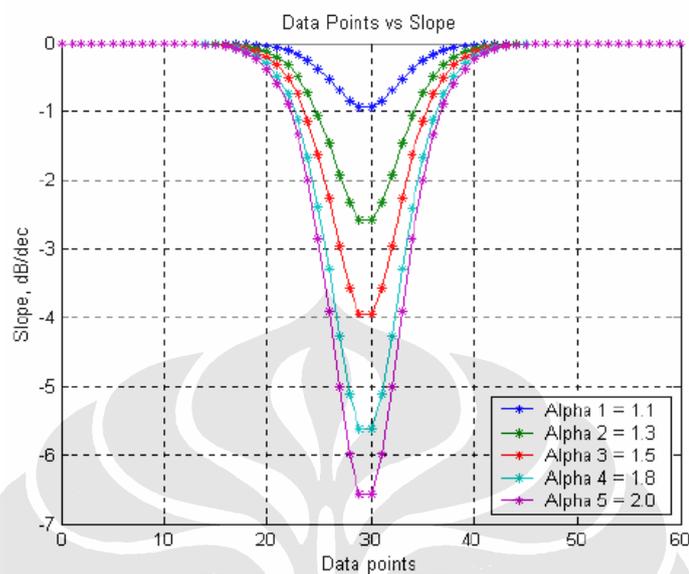
Frekuensi tengah adalah nilai frekuensi titik maksimum pada kurva. Berikut ini adalah diagram alir dari tahapan untuk menentukan frekuensi tengah.



Gambar 3.9 Diagram alir untuk menentukan frekuensi tengah

Gambar di atas menunjukkan proses untuk menentukan kemiringan. Pertama, frekuensi induktansi operasional diubah menjadi bentuk logaritma. Frekuensi dalam bentuk logaritma ini akan digunakan untuk menentukan kemiringan magnitud dengan menggunakan persamaan 3.2. Frekuensi tengah yang merupakan nilai maksimum dari kemiringan akan dapat ditentukan dari nilai nol pada penurunan pertama persamaan 3.3.

Dengan mempertahankan nilai frekuensi tengah pada 1 Hz dan mengubah α , dan menetapkan sumbu x adalah titik data(bukan α) akan diperoleh kurva sebagai berikut:

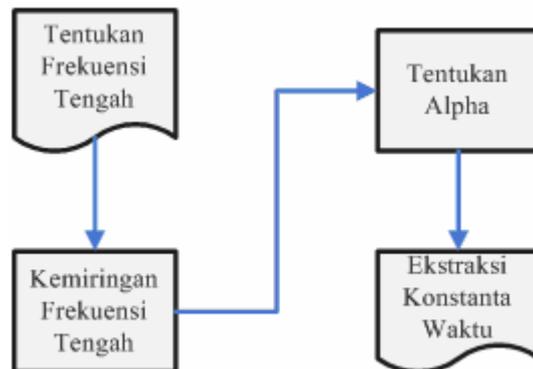


Gambar 3.10. Perbandingan nilai data poin dengan kemiringan

Dengan memperoleh nilai alpha dan frekuensi tengah, maka dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 akan didapatkan konstanta waktu.

3.3.3 Menentukan Nilai Alpha

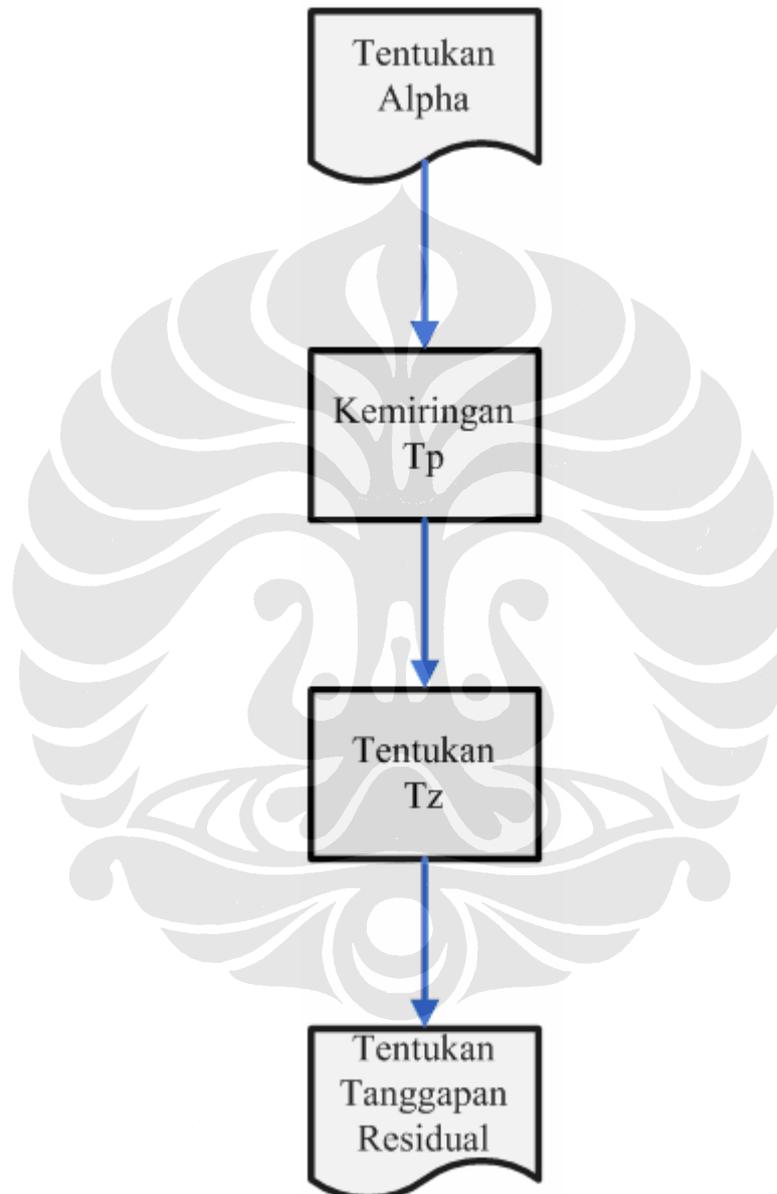
Dengan diperolehnya nilai dari frekuensi tengah, maka nilai kemiringan dari frekuensi tengah ini akan digunakan untuk menentukan nilai alpha seperti yang terlihat pada diagram alir pada gambar 3.10. dengan demikian, diagram alir untuk mendapatkan nilai alpha adalah sebagai berikut:



Gambar 3.11 Diagram alir untuk menentukan alpha

3.3.4 Ekstraksi Nilai Konstanta Waktu

Konstanta waktu dari induktansi operasional dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 pada bab dua. Dengan memperoleh nilai frekuensi tengah dan alpha maka proses untuk menentukan konstanta waktu adalah seperti berikut

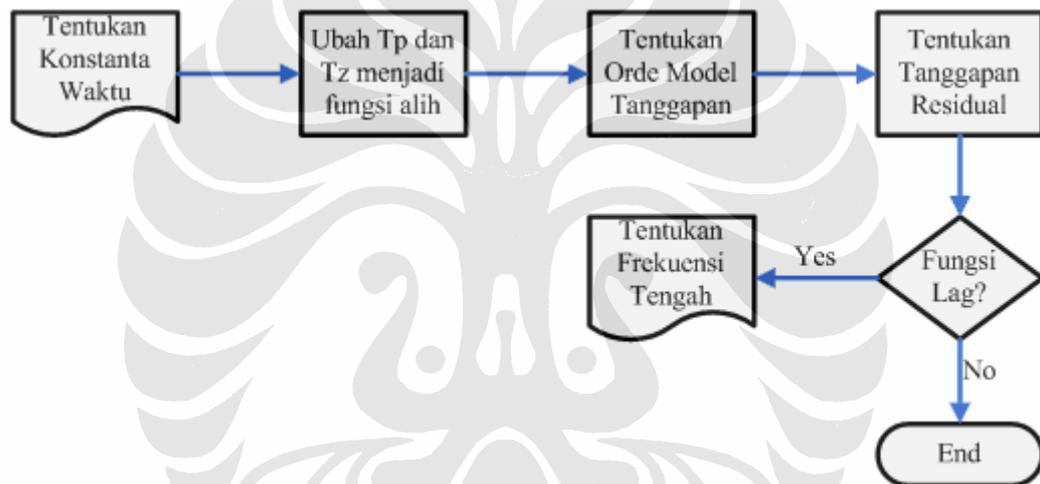


Gambar 3.12 Diagram alir menentukan konstanta waktu

3.3.5 Menentukan Tanggapan Residual

Konstanta waktu yang diperoleh, diubah kembali menjadi bentuk fungsi alih untuk menentukan model orde dari tanggapan yang diperoleh. Bentuk fungsi alih akan didapat dengan menggunakan persamaan (2.16). Dengan setiap pasangan *pole-zero* diidentifikasi, pengurangan dari tanggapan frekuensi dari induktansi operasional akan menghasilkan tanggapan frekuensi yang baru. Tanggapan frekuensi baru (tanggapan tertinggal) akan mengidentifikasi *pole-zero* baru dari frekuensi tengah yang berikutnya.

Gambar di bawah ini akan mengilustrasikan pengulangan program ini hingga diperoleh model orde empat.



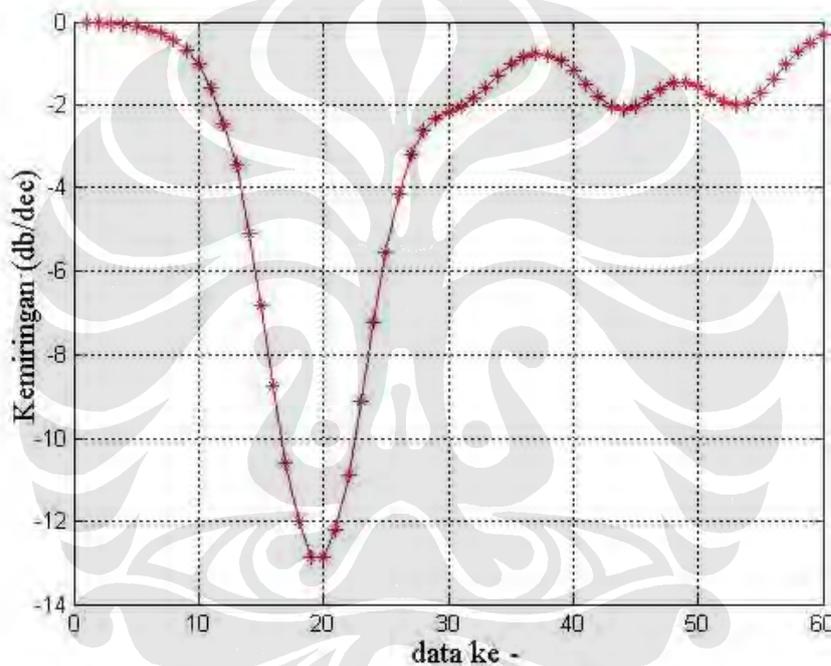
Gambar 3.13 Diagram alir untuk menentukan tanggapan residual pada sistem

BAB IV

ANALISIS EKSTRAKSI KONSTANTA WAKTU

4.1 MODEL ORDE SATU

Sesuai dengan diagram alir alur identifikasi parameter pada gambar 3.2, dari data uji tanggapan frekuensi harus ditentukan perbandingan kemiringan terhadap alpha untuk dapat menentukan nilai dari frekuensi tengah.



Gambar 4.1. Nilai kemiringan model orde satu

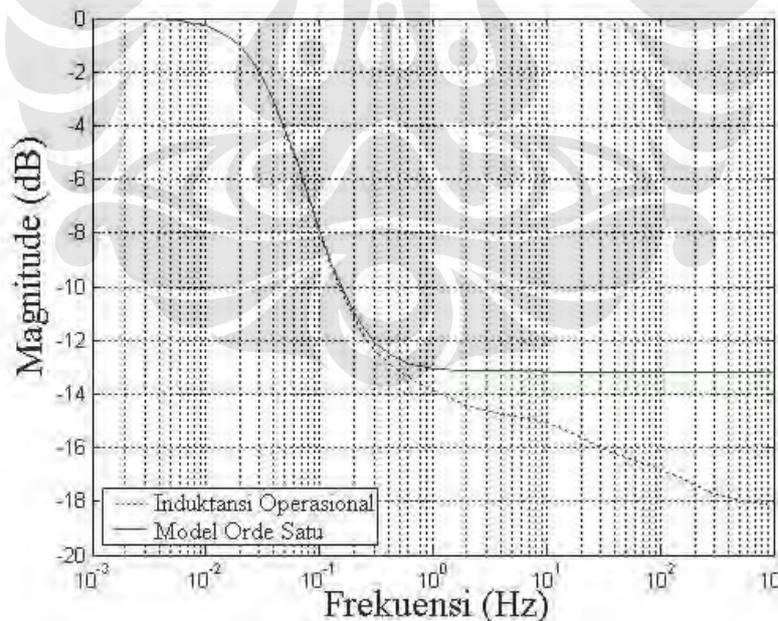
Grafik di atas menunjukkan nilai kemiringan besaran dari induktansi operasional pada setiap data uji tanggapan frekuensi. Titik-titik data ini menunjukkan jumlah dari data uji tanggapan frekuensi yang diperoleh dari data generator serempak. Grafik frekuensi tengah di atas akan digunakan untuk menentukan hubungan dengan konstanta alpha dan konstanta waktu pole maupun zero. Karena kurva pada gambar 4.1 memiliki kemiripan dengan kurva fasa pada gambar 3.4, maka nilai frekuensi tengah dapat ditentukan dengan kemiringan maksimum sebagai fasa maksimum pada pemrograman yang dilakukan. Dengan

demikian frekuensi tengah untuk orde satu dapat ditentukan dari nilai kemiringan maksimum.

Dari gambar 4.1 terlihat bahwa data ke-19 dan data ke-20 memiliki nilai yang maksimum. Sehingga nilai frekuensi tengah yang sebenarnya berada di antara dua data ini. Dari pemrograman yang dilakukan diperoleh nilai frekuensi tengah sebesar 0.0794 dan untuk konstanta alpha diperoleh sebesar 4.55. Dengan demikian dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 akan didapatkan nilai konstanta waktu untuk *pole* adalah sebesar 4.2757 dan konstanta waktu untuk *zero* adalah sebesar 0.9397. Dengan memperoleh nilai konstanta waktu, maka akan didapat nilai induktansi operasional untuk model orde satu dengan menggunakan persamaan 2.16, yaitu

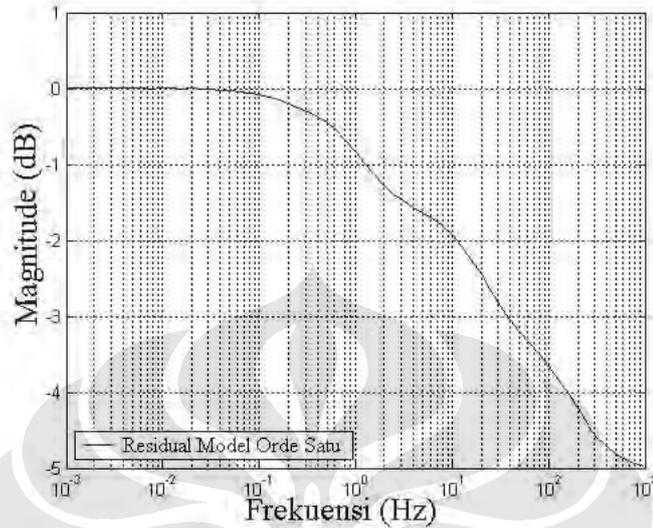
$$Ld(s) = Ld \frac{(1 + 4.2757s)}{(1 + 0.9397s)}$$

Berikut ini adalah gambar kurva tanggapan frekuensi model orde satu dan kurva tanggapan frekuensi induktansi operasional:



Gambar 4.2. Tanggapan frekuensi untuk model orde satu

Dengan mengurangi kurva tanggapan induktansi operasional dengan kurva tanggapan orde satu, akan diperoleh kurva tanggapan frekuensi residual seperti yang didapatkan pada gambar 4.3 berikut ini:

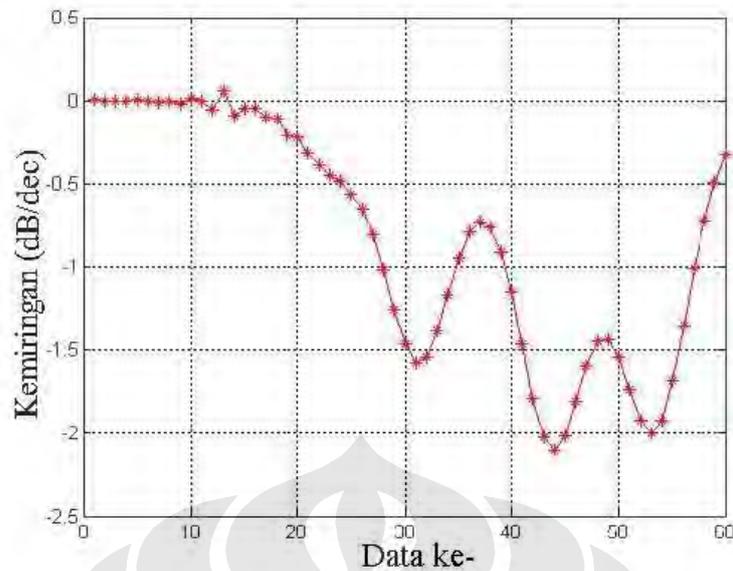


Gambar 4.3. Kurva tanggapan residual model orde satu

Tanggapan frekuensi residual ini akan digunakan untuk menentukan parameter untuk model orde selanjutnya.

4.2 MODEL ORDE DUA

Model orde dua menggunakan konsep yang sama seperti halnya pada model orde satu untuk menentukan frekuensi tengah. Namun, data yang didapatkan dari kurva tanggapan residual model orde satu akan digunakan untuk menentukan frekuensi tengah model orde dua. Kurva tanggapan yang dipakai untuk menentukan frekuensi tengah dari model orde dua akan menjadi sebagai berikut:

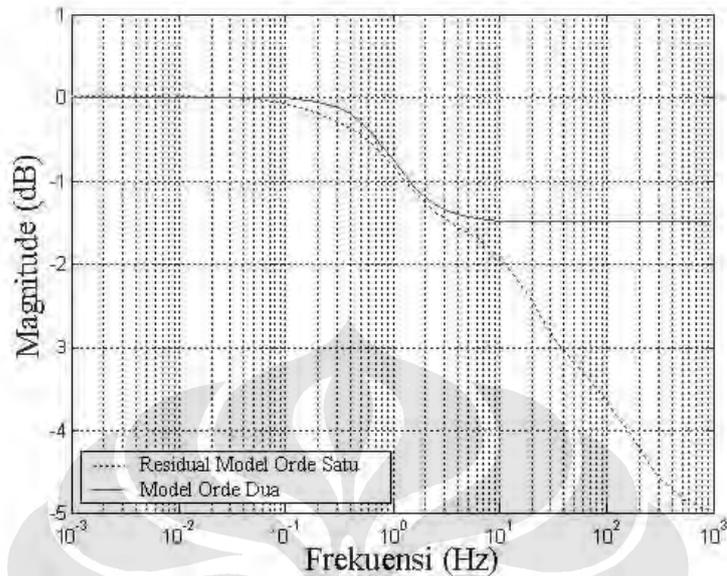


Gambar 4.4. Kurva frekuensi tengah model orde dua

Kurva pada gambar 4.4 mengindikasikan adanya kesalahan berkisar pada data ke-10 dengan data ke-15. Kesalahan ini disebabkan karena adanya *noise* pada data tanggapan frekuensi yang dipakai. Dengan adanya kesalahan ini, maka program akan memulai untuk menentukan frekuensi tengah model orde dua setelah titik frekuensi tengah model orde satu (setelah data ke-19). Dengan demikian diperoleh kisaran kesalahan sekitar 0.2 dB/detik yang masih cukup ideal. Dari pemrograman yang dilakukan diperoleh nilai frekuensi tengah sebesar 1 dan untuk konstanta alpha diperoleh sebesar 1.19. Dengan demikian dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 akan didapatkan nilai konstanta waktu untuk *pole* adalah sebesar 0.1736 dan konstanta waktu untuk *zero* adalah sebesar 0.1459. Dengan memperoleh nilai konstanta waktu, maka akan didapat nilai induktansi operasional untuk model orde satu dengan menggunakan persamaan 2.16, yaitu

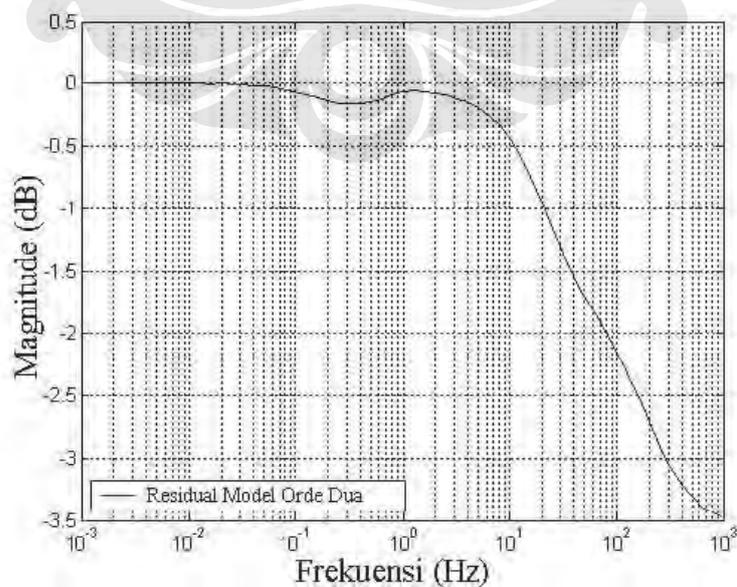
$$Ld(s) = Ld \frac{(1 + 4.2757s)(1 + 0.1736s)}{(1 + 0.9397s)(1 + 0.1459s)}$$

Dengan membandingkan kurva tanggapan frekuensi model orde dua yang diperoleh dengan kurva tanggapan residual model orde satu sebagai berikut:



Gambar 4.5. Tanggapan frekuensi untuk model orde dua

Dari gambar 4.5 terlihat bahwa adanya perbedaan antara resultan kedua kurva tersebut. Perbedaan resultan ini menunjukkan adanya ketidakakuratan ekstraksi konstanta waktu untuk model orde dua. Kurva tanggapan residual untuk model orde dua dapat diperoleh dengan mengurangi data tanggapan residual model orde satu dengan data tanggapan model orde dua.

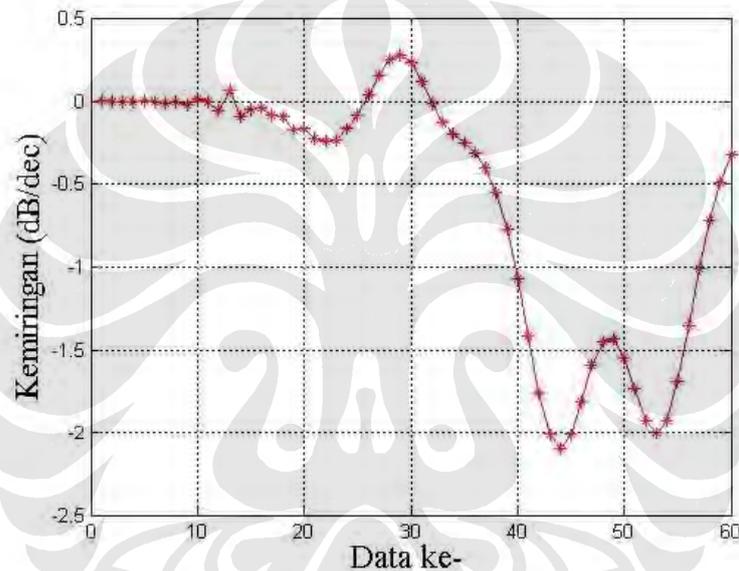


Gambar 4.6. Kurva tanggapan residual model orde dua

Dari kurva tanggapan residual model orde dua diperoleh kesalahan sebesar -0.2 dB. Data tanggapan frekuensi residual model orde dua akan digunakan untuk menentukan parameter pada model orde selanjutnya.

4.3 MODEL ORDE TIGA

Seperti halnya pada model orde dua, pada model orde tiga, data tanggapan residual dari model orde sebelumnya akan digunakan untuk menentukan frekuensi tengah. Dengan demikian data tanggapan residual model orde dua dipakai untuk mendapatkan grafik seperti berikut:



Gambar 4.7. Kurva frekuensi tengah model orde tiga

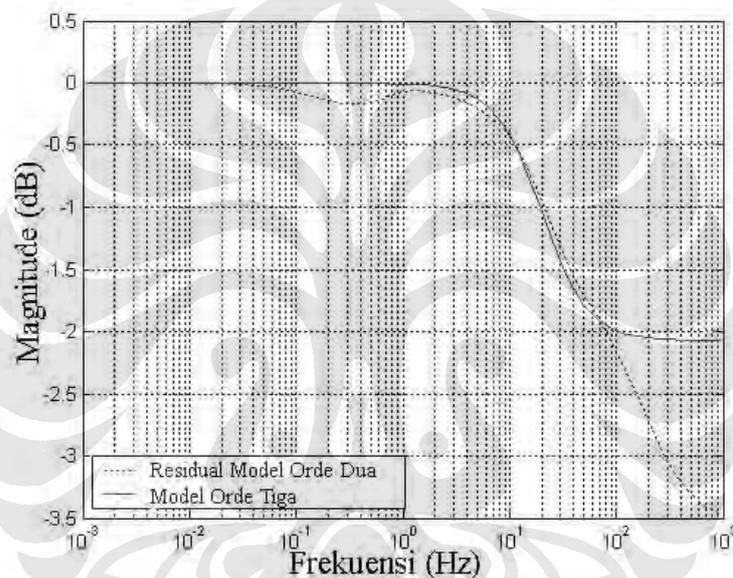
Pada model orde tiga terdapat kesalahan sekitar 0.4 dB/detik. Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan kesalahan yang berkelanjutan. Untuk mereduksi kesalahan maka untuk menentukan frekuensi tengah dari model orde tiga akan dimulai dari data frekuensi tengah model orde dua. Kurva pada gambar 4.7 menunjukkan ada dua frekuensi tengah pada kurva tanggapan untuk model orde tiga. Hal ini berarti secara keseluruhan terdapat empat pasangan *pole-zero* pada tanggapan frekuensi induktansi operasional yang dijalankan.

Dari pemrograman yang dilakukan diperoleh nilai frekuensi tengah sebesar 19.9526 dan untuk konstanta alpha diperoleh sebesar 1.27. Dengan demikian dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 akan didapatkan nilai konstanta

waktu untuk *pole* adalah sebesar 0.009 dan konstanta waktu untuk *zero* adalah sebesar 0.0071. Dengan memperoleh nilai konstanta waktu, maka akan didapat nilai induktansi operasional untuk model orde satu dengan menggunakan persamaan 2.16, yaitu

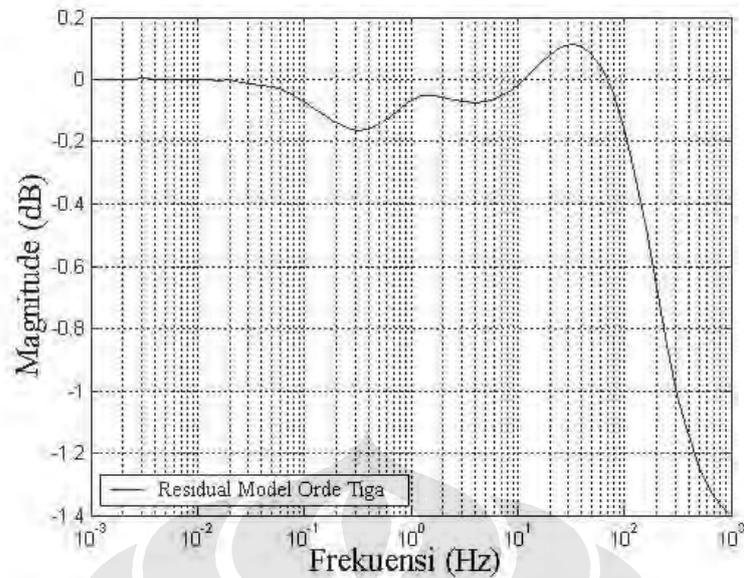
$$Ld(s) = Ld \frac{(1 + 4.2757s)(1 + 0.1736s)(1 + 0.009s)}{(1 + 0.9397s)(1 + 0.1459s)(1 + 0.0071s)}$$

Dengan membandingkan kurva tanggapan frekuensi model orde tiga yang diperoleh dengan kurva tanggapan residual model orde dua sebagai berikut:



Gambar 4.8. Tanggapan frekuensi untuk model orde tiga

Pada gambar 4.8, kurva tanggapan frekuensi model orde tiga yang didapatkan, dibandingkan dengan kurva tanggapan residual model orde dua. Pada gambar 4.8 terlihat adanya perbedaan antara kedua kurva ini. Seperti halnya pada model orde dua, adanya perbedaan antara kedua kurva ini menunjukkan adanya ketidakakuratan pada ekstraksi konstanta waktu untuk model orde ketiga. Dengan mengurangkan kedua kurva pada gambar 4.8 akan didapatkan kurva tanggapan frekuensi residual untuk model orde tiga sebagai berikut:

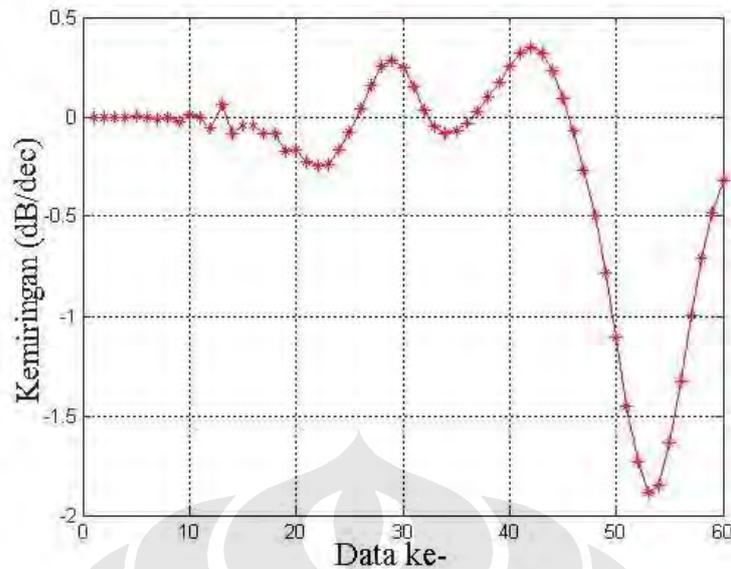


Gambar 4.9. Kurva tanggapan residual model orde tiga

Dari gambar 4.9 terlihat adanya kesalahan sebesar ± 0.2 db yang masih dapat dianggap ideal. Data tanggapan frekuensi residual model orde tiga akan dapat digunakan untuk menentukan parameter pada model orde empat.

4.4 MODEL ORDE EMPAT

Model orde empat adalah model dengan orde paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada tanggapan frekuensi model orde tiga diperoleh dua frekuensi tengah. Dengan demikian model orde empat merupakan orde model terakhir dari data tanggapan frekuensi yang diperoleh.



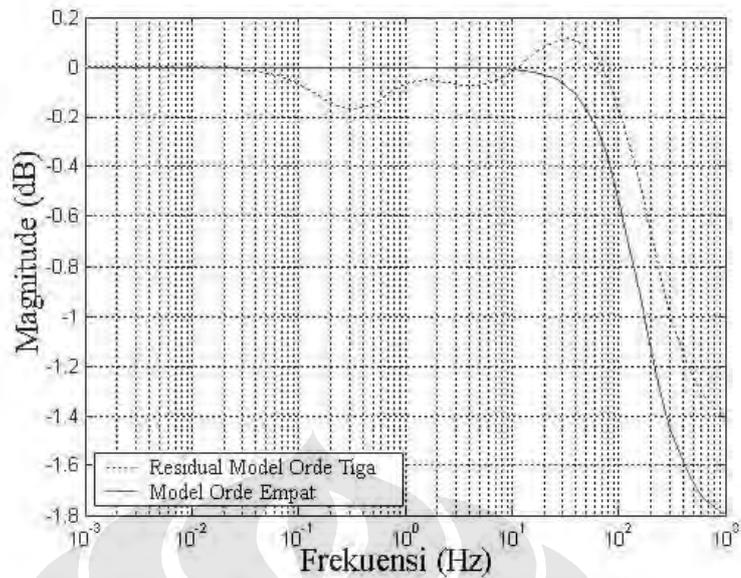
Gambar 4.10. Kurva frekuensi tengah model orde empat

Dari kurva pada gambar 4.10 apabila dibandingkan dengan kurva pada gambar 4.7 hanya ada perbedaan dengan tidak adanya nilai maksimum untuk model orde tiga. Dengan demikian pasangan *pole-zero* untuk model orde empat ini akan diekstraksi dari data tanggapan residual model orde tiga. Karena kesalahan kurva tanggapan merupakan akumulasi sejak dari model orde pertama, maka program yang dibuat akan menentukan frekuensi tengah model orde empat setelah data frekuensi tengah model orde tiga.

Dengan pemrograman yang dilakukan diperoleh nilai frekuensi tengah sebesar 158.4893 dan untuk konstanta alpha diperoleh sebesar 1.24. Dan dengan menggunakan persamaan 2.19 dan 2.20 akan didapatkan nilai konstanta waktu untuk *pole* adalah sebesar 0.0011 dan konstanta waktu untuk *zero* adalah sebesar 0.0009018. Dengan memperoleh nilai konstanta waktu, maka akan didapat nilai induktansi operasional untuk model orde satu dengan menggunakan persamaan 2.16, yaitu

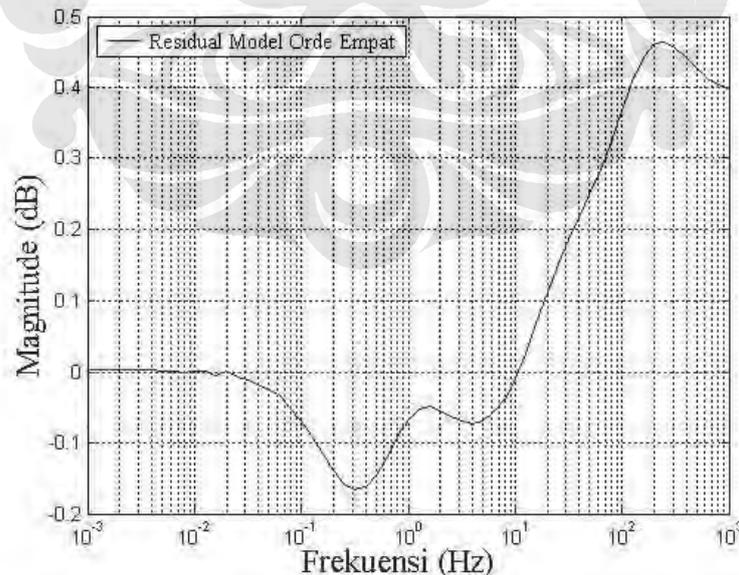
$$Ld(s) = Ld \frac{(1 + 4.2757s)(1 + 0.1736s)(1 + 0.009s)(1 + 0.0011s)}{(1 + 0.9397s)(1 + 0.1459s)(1 + 0.0071s)(1 + 0.0009018s)}$$

Dengan membandingkan kurva tanggapan frekuensi model orde empat yang diperoleh dengan kurva tanggapan residual model orde tiga sebagai berikut:



Gambar 4.11. Tanggapan frekuensi untuk model orde empat

Dengan membandingkan kurva tanggapan frekuensi model orde empat dengan kurva tanggapan residual model orde tiga diperoleh ketidakakuratan. Hal ini terlihat dengan mengatur frekuensi pada 100 Hertz, dimana besaran dari kurva tanggapan model orde empat akan bernilai -0.6 dB sedangkan tanggapan residual model orde tiga akan bernilai -0.2 dB, yang memberikan perbedaan sebesar 0.4 dB.

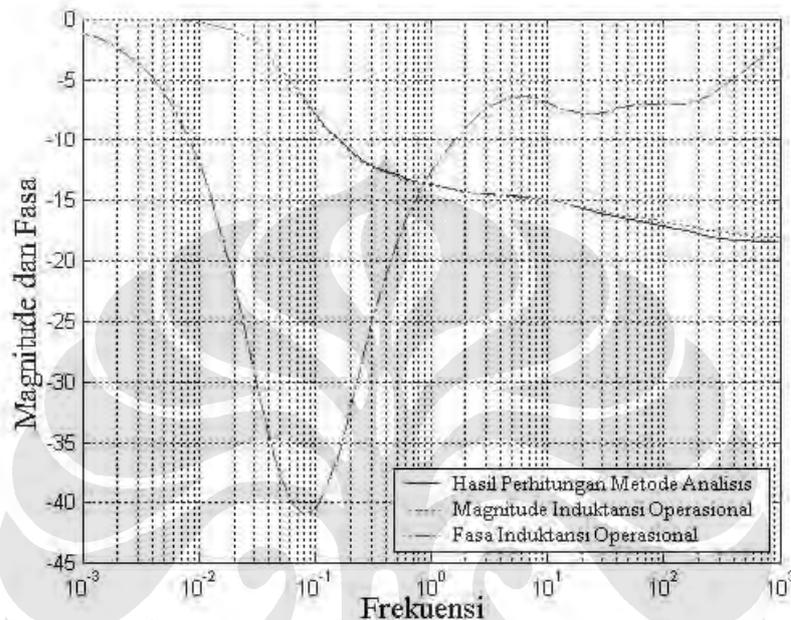


Gambar 4.12. Kurva tanggapan residual model orde empat

Dari kurva tanggapan residual untuk model orde empat diperoleh kesalahan yang mendekati 0.5 dB.

4.5 ANALISIS NILAI AWAL KONSTANTA WAKTU

Ekstraksi konstanta waktu hingga model orde empat selesai dengan adanya kesalahan pada proses ekstraksi. Pada gambar 4.13 di bawah ini nilai besaran yang didapatkan dari perhitungan metode analisis dibandingkan dengan besaran pada induktansi operasional.



Gambar 4.13. Perbandingan kurva besaran model orde empat dengan kurva besaran induktansi operasional

Dari gambar 4.13, dengan menggunakan metode pencocokan kurva, terlihat bahwa penggunaan metode analisis sistematis untuk menganalisa data uji tanggapan frekuensi akan memberikan hasil yang akurat meskipun pada proses terdapat kesalahan-kesalahan karena adanya *noise* pada data uji tanggapan frekuensi yang dipakai.

BAB V

KESIMPULAN

1. Data nilai besaran dari hasil uji tanggapan frekuensi pada generator serempak dapat dipakai untuk menentukan konstanta waktu pada fungsi alih generator tersebut.
2. Untuk mendapatkan fungsi alih dari generator serempak, terdapat 3 tahapan langkah yang harus dijalankan:
 - Mengkonversi data impedansi menjadi induktansi operasional;
 - Ekstraksi konstanta waktu dari induktansi operasional;
 - Menentukan parameter pada rangkaian pengganti model generator serempak yang dipakai.
3. Banyaknya titik frekuensi tengah yang diperoleh akan menentukan orde dari model yang dipakai.
4. Ekstraksi konstanta waktu dari data besaran hasil uji tanggapan frekuensi dengan menggunakan metode analisis sistematis akan memberikan nilai yang akurat, bahkan pada generator serempak dengan model orde tinggi seperti orde empat.
5. Penelitian yang dilakukan memberikan hasil sebagai berikut:

Orde Model	Alpha	Frekuensi Tengah	Konstanta Waktu <i>pole</i>	Konstanta Waktu <i>zero</i>
1	4.55	0.0794	4.2757	0.9397
2	1.19	1	0.1736	0.1459
3	1.27	19.9526	0.009	0.0071
4	1.24	158.4893	0.0011	0.0009018

DAFTAR ACUAN

[1] Ong, Chee Mun, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1997.

[2a] Allan Walton, "The Extraction of Parameters for Synchronous Machines From The Results of Frequency Response Tests," James Cook University of North Queensland, Australia

[2b] Allan Walton, "Characteristics of Equivalent Circuits of Synchronous Machines," *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 143, No. 1, Januari. 1996, hal. 31-40.

[3] S. Henschel dan H. W. Dommel, "Noniterative Synchronous Machine Parameter Identification from Frequency Response Tests," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, Mei 1999, hal. 553 – 560.

[4] A. Keyhani and H.Tsai, " Identification of High-Order Synchronous Generator Models from SSFR Test Data," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 3, September 1994, hal. 593 – 603.

[5] I. M. Canay, "Determination of the Model Parameters of Machines from the Reactance Operators $X_d(p)$, $X_q(p)$," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, Juni 1993.

[6] Allan Walton, "A Systematic Method for the Determination of the Parameters of Synchronous Machines from the Results of Frequency Response Tests," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 2, Juni 2000, hal. 218 – 223.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Keyhani and H.Tsai, "Identification of High-Order Synchronous Generator Models from SSFR Test Data," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 3, September 1994, hal. 593 – 603.
- Chapman, Stephen J., "Electric Machinery and Power System Fundamentals," McGraw-Hill, New York, 2002.
- Chin Aun Yeoh, "Analysis of Frequency Response of Synchronous Machines Using the Magnitude Data," Thesis, Bachelor of Engineering The University of Queensland, Oktober 2001..
- I. M. Canay, "Determination of the Model Parameters of Machines from the Reactance Operators $X_d(p)$, $X_q(p)$," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, Juni 1993.
- L. X. Le dan W. J. Wilson, "Synchronous Machine Parameter Identification A Time Domain Approach," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 2, Juni 1988.
- Nise, Norman S, "Control System Engineering, 4th edition," John Wiley and Sons, Inc. 2003
- Ogata, Katsuhiko, "Modern Control Engineering, 4th edition," Prentice Hall, 2002
- Ong, Chee Mun, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink," Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1997.
- Rafael Escarela-Perez, Tadeusz Niewierowicz, dan Eduardo Campero-Littlewood, "Synchronous Machine Parameters from Frequency-Response Finite-Element Simulations and Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 16, No. 2, Juni 2001
- Saunders, Robert M., "Synchronous Machine Standstill Frequency Response Test Data Analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 3, September 1991
- S. Henschel dan H. W. Dommel, "Noniterative Synchronous Machine Parameter Identification from Frequency Response Tests," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, Mei 1999, hal. 553 – 560.

Walton, Allan, "A Systematic Method for the Determination of the Parameters of Synchronous Machines from the Results of Frequency Response Tests," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 2, Juni 2000, hal. 218 – 223.

Walton, Allan, "Characteristics of Equivalent Circuits of Synchronous Machines," *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 143, No. 1, Januari. 1996, hal. 31-40.

Walton, Allan, "The Extraction of Parameters for Synchronous Machines From The Results of Frequency Response Tests," James Cook University of North Queensland, Australia.



Lampiran 1 Data Impedansi Generator Serempak [6]

Impedansi	Nilai
Ra	0.002
Ld	0.0049
La	0.0004
Lm	0.0045
Rf	0.00146
Lf	0.00095
Rj	0.01918
Lj	0.00218
Rk	0.239
Lk	0.00138
Rl	1.18
Ll	0.0007

Lampiran 2 Data Uji Tanggapan Frekuensi Generator Serempak [6]

Frekuensi	Magnitud	Fasa
0.0010	45.4359	1.2205
0.0013	45.4377	1.5362
0.0016	45.4405	1.9335
0.0020	45.4448	2.4330
0.0025	45.4518	3.0608
0.0032	45.4628	3.8491
0.0040	45.4802	4.8373
0.0050	45.5076	6.0730
0.0063	45.5506	7.6123
0.0079	45.6178	9.5182
0.0100	45.7220	11.8561
0.0126	45.8818	14.6829
0.0158	46.1224	18.0278
0.0200	46.4758	21.8613
0.0251	46.9771	26.0588
0.0316	47.6571	30.3721
0.0398	48.5311	34.4355
0.0501	49.5889	37.8222
0.0631	50.7914	40.1362
0.0794	52.0759	41.1012
0.1000	53.3666	40.6154
0.1259	54.5875	38.7703
0.1585	55.6742	35.8360
0.1995	56.5855	32.2109
0.2512	57.3100	28.3353
0.3162	57.8636	24.5948
0.3981	58.2801	21.2531

0.5012	58.6001	18.4336
0.6310	58.8607	16.1381
0.7943	59.0902	14.2821
1.0000	59.3039	12.7388
1.2589	59.5048	11.3880
1.5849	59.6871	10.1581
1.9953	59.8437	9.0403
2.5119	59.9715	8.0699
3.1623	60.0735	7.2944
3.9811	60.1573	6.7497
5.0119	60.2329	6.4512
6.3096	60.3113	6.3932
7.9433	60.4037	6.5474
10.0000	60.5201	6.8590
12.5893	60.6678	7.2434
15.8489	60.8474	7.5939
19.9526	61.0507	7.8094
25.1189	61.2622	7.8348
31.6228	61.4643	7.6876
39.8107	61.6458	7.4468
50.1187	61.8056	7.2112
63.0957	61.9511	7.0565
79.4328	62.0950	7.0103
100.0000	62.2497	7.0446
125.8925	62.4234	7.0827
158.4893	62.6156	7.0225
199.5262	62.8161	6.7767
251.1886	63.0085	6.3135
316.2278	63.1770	5.6692
398.1072	63.3125	4.9239
501.1872	63.4141	4.1627

630.9573	63.4862	3.4486
794.3282	63.5354	2.8165
999.9900	63.5681	2.2780



Lampiran 2 Program Utama

```
%*****  
  
% Program Utama  
%*****  
  
c = sprintf('\n Analisis Uji Tanggapan Frekuensi');  
disp(c);  
global row w  
Data % Data Generator (Frekuensi Besaran Fasa)  
  
%*****  
% Menentukan Kurva Tanggapan Frekuensi Besaran Induktansi Operasional  
%*****  
[row,column] = size(z);  
f = [z(:,1)];  
w = 2*pi*f;  
  
%.....  
% Plot Kurva Tanggapan Frekuensi Besaran Induktansi Operasional  
%.....  
mopi = [z(:,2)]+ 45.4359;  
popi = [z(:,3)];  
figure  
semilogx(f,mopi,f,popi,':')  
title('Operational Inductance (OPI)')  
xlabel('Frequency, Hz')  
ylabel('Magnitude, dB and Phase, Degree')  
legend('OPI Magnitude','OPI Phase',4)  
grid  
% Fr % Plot the Slope vd Alpha (CONCEPT)  
Equation % Create Lookup Table
```

```

%*****
% Model Orde Satu
%*****
%.....
% Tentukan Frekuensi Tengah
%.....
Slo_log = Slope(z); % numbers of slope for the opi
Slo_log_1 = Slo_log;
figure
plot (Slo_log,'*-r')
xlabel('Data ke-')
ylabel('Kemiringan, dB/dec')
grid
row1 = find(Slo_log <= min(Slo_log));
row_z1 = z(row1,:);
Fc1 = row_z1(:,1)
row_slo1 = Slo_log(row1,:);

%.....
% Tentukan Alpha
%.....
al_table1 = Table(:,2) - row_slo1;
table_num1 = min(find(al_table1 <= 0));
line_al_tab1 = Table(table_num1,:);
Alpha1 = line_al_tab1(:,1)

%.....
% Tentukan Pole-Zero
%.....
tp1 = sqrt(Alpha1)/(2*pi*Fc1)
tz1 = tp1/Alpha1
%.....

```

```

% Plot Model Orde Satu
%.....
z1i = [1 + j*w*tz1];
p1i = [1 + j*w*tp1];
pz_1 = z1i./p1i;
fc_1 = 1/(2*pi*sqrt(tz1*tp1));
a1i = tp1/tz1;
mpz_1 = 20*log10(abs(pz_1));
figure
semilogx(f,mopi,'f,mpz_1)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Induktansi Operasional','Model Orde Satu',3)
grid

%.....
% Plot Residual
%.....
Mag2 = mopi - mpz_1;
figure
semilogx(f,Mag2)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Satu',3)
grid

% *****

% Model Orde Dua
% *****

%.....
% Tentukan Frekuensi Tengah
%.....

```

```

z2 = [f,Mag2];
Slo_log = Slope(z2);
Slog_log_2 = Slo_log;
figure
plot (Slo_log,'*-r')
xlabel('Data ke-')
ylabel('Kemiringan, dB/dec')
grid
row2 = row1;
Now2 = Slo_log(row2);
row2 = row2 + 1;
next2 = Slo_log(row2);
while (Now2 < 0 & Now2 > next2)
Now2 = next2;
row2 = row2 + 1;
next2 = Slo_log(row2);
end;
row2 = row2 - 1;
row_z2 = z2(row2,:);
Fc2 = row_z2(:,1)
row_slo2 = Slo_log(row2,:);

%.....
% Tentukan Alpha
%.....
al_table2 = Table(:,2) - row_slo2;
table_num2 = min(find(al_table2 <= 0));
line_al_tab2 = Table(table_num2,:);
Alpha2 = line_al_tab2(:,1)

%.....
% Tentukan Pole-Zero

```

```

%.....
tp2 = sqrt(Alpha2)/(2*pi*Fc2)
tz2 = tp2/Alpha2

%.....
% Model Orde Dua
%.....
z2i = [1 + j*w*tz2];
p2i = [1 + j*w*tp2];
pz_2 = z2i./p2i;
fc_2 = 1/(2*pi*sqrt(tz2*tp2));
a2i = tp2/tz2;
mpz_2 = 20*log10(abs(pz_2));
figure
semilogx(f,Mag2,'f,mpz_2)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Satu','Model Orde Dua',3)
grid

%.....
% Plot Residual
%.....
Mag3 = Mag2 - mpz_2;
figure
semilogx(f,Mag3)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Dua',3)
grid

```

```

%*****

% Model Orde Tiga
%*****

%.....

% Tentukan Frekuensi Tengah
%.....

z3 = [f,Mag3];
Slo_log = Slope(z3);
Slo_log_3 = Slo_log;
figure
plot (Slo_log,'*-r')
xlabel('Data ke-')
ylabel('Kemiringan, dB/dec')
grid
row3 = row2+1
Now3 = Slo_log(row3);
row3 = row3 + 1;
next3 = Slo_log(row3);
while (Now3 < 0 & Now3 > next3)
Now3 = next3;
row3 = row3 + 1;
next3 = Slo_log(row3);
end;
row3 = row3 - 1;
row_z3 = z3(row3,:);
Fc3 = row_z3(:,1);
row_slo3 = Slo_log(row3,:);

%.....

% Tentukan Alpha
%.....

al_table3 = Table(:,2) - row_slo3;

```

```

table_num3 = min(find(al_table3 <= 0));
line_al_tab3 = Table(table_num3,:);
Alpha3 = line_al_tab3(:,1)

%.....
% Tentukan Pole-Zero
%.....
tp3 = sqrt(Alpha3)/(2*pi*Fc3)
tz3 = tp3/Alpha3

%.....
% Model Orde Tiga
%.....
z3i = [1 + j*w*tz3];
p3i = [1 + j*w*tp3];
pz_3 = z3i./p3i;
fc_3 = 1/(2*pi*sqrt(tz3*tp3));
a3i = tp3/tz3;
mpz_3 = 20*log10(abs(pz_3));
figure
semilogx(f,Mag3,'f',f,mpz_3)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Dua','Model Orde Tiga',3)
grid

%.....
% Plot Residual
%.....
Mag4 = Mag3 - mpz_3;
figure
semilogx(f,Mag4)
xlabel('Frekuensi, Hz')

```

```

ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Tiga',3)
grid

%*****

% Model Orde Empat
%*****

%.....

% Tentukan Frekuensi Tengah
%.....

z4 = [f,Mag4];
Slo_log = Slope(z4);
Slo_log_4 = Slo_log;
figure
plot (Slo_log,'*-r')
xlabel('Data ke-')
ylabel('Kemiringan, dB/dec')
grid
row4 = row3+6;
Now4 = Slo_log(row4);
row4 = row4 + 1;
next4 = Slo_log(row4);
while (Now4 < 0 & Now4 > next4)
Now4 = next4;
row4 = row4 + 1;
next4 = Slo_log(row4);
end;
row4 = row4 - 1;
row_z4 = z4(row4,:);
Fc4 = row_z4(:,1)
row_slo4 = Slo_log(row4,:);

```

```

%.....
% Tentukan Alpha
%.....
al_table4 = Table(:,2) - row_slo4;
table_num4 = min(find(al_table4 <= 0));
line_al_tab4 = Table(table_num4,:);
Alpha4 = line_al_tab4(:,1)

%.....
% Tentukan Pole-Zero
%.....
tp4 = sqrt(Alpha4)/(2*pi*Fc4)
tz4 = tp4/Alpha4

%.....
% Model Orde Empat
%.....
z4i = [1 + j*w*tz4];
p4i = [1 + j*w*tp4];
pz_4 = z4i./p4i;
fc_4 = 1/(2*pi*sqrt(tz4*tp4));
a4i = tp4/tz4;
mpz_4 = 20*log10(abs(pz_4));
figure
semilogx(f,Mag4,'.',f,mpz_4)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Tiga','Model Orde Empat',3)
grid

%.....
% Plot Residual
%.....

```

```

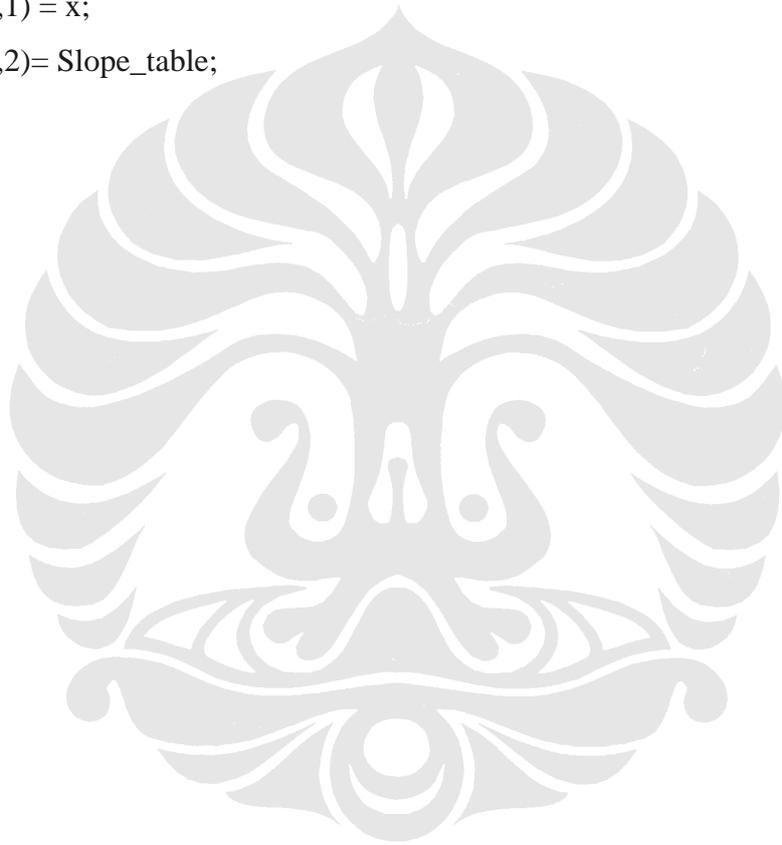
Mag5 = Mag4 - mpz_4;
figure
semilogx(f,Mag5)
xlabel('Frekuensi, Hz')
ylabel('Magnitude, dB')
legend('Residual Model Orde Empat',2)
grid

% *****
% Perbandingan Besaran Induktansi Operasional dengan Metode Analisis
% *****
mpz_1234i = mpz_1+mpz_2+mpz_3+mpz_4;
figure
semilogx(f,mpz_1234i,f, mopi,':',f,popi,'-')
xlabel('Frekuensi')
ylabel('Magnitude and Fasa')
legend('Hasil Perhitungan Metode Analisis','Magnitude Induktansi
Operasional','Fasa Induktansi Operasional',4)
grid

```

Lampiran 3 Sub Program Membuat Tabel Perbandingan Alpha dengan Kemiringan

```
for p = 1:5000
x=p*0.0015;
Slope_table = (1.4176e-13*(x^10))-(4.7019e-11*(x^9))+(6.7446e-9*(x^8)) ...
-(5.4816e-7*(x^7))+(2.7789e-5*(x^6))-(0.0009121*(x^5))+(0.019497*(x^4)) ...
-(0.26669*(x^3))+(2.2435*(x^2))-(10.91*x)+8.6266;
Table(p,1) = x;
Table(p,2)= Slope_table;
end
```



Lampiran 4 Sub Program Data

```
function sl = Slope(z)
global row
freq_mag = z;
freq_log = log10(freq_mag(:,1));
for count1 = 1:(row-1);
freq = freq_log(count1+1,1) - freq_log(count1,1);
mag = freq_mag(count1+1,2) - freq_mag(count1,2);
dif = mag/freq;
ar(count1) = dif;
end
sl = ar';
```



Lampiran 5 Sub Program Memperbaiki Frekuensi Tengah

```
%*****
% Menghitung Kemiringan dengan Fc=1 dan mengubah nilai alpha
%*****

global row w
fci=1;
flog=log10(z(:,1));
al=[1:row]';
% v=zeros(row,row);
for count = 1:row
val = al(count);
%.....
% Hitung Pasangan pole-zero
%.....
tp1i = sqrt(val)/(2*pi*fci);
tz1i = tp1i/val;
z1i = [1 + j*w*tz1i
p1i = [1 + j*w*tp1i];
pz1i = z1i./p1i;
mpz1i = 20*log10(abs(pz1i));

%.....
% Hitung Range Frekuensi
%.....
NFC1 = min(find(fci<=f));
NLo = NFC1 - 1;
NHi = NFC1 + 1;
fLo = flog(NLo);
fHi = flog(NHi);
```

```

%.....
% Hitung Range Magnitude
%.....
magLo = mpz1i(NLo);
magHi = mpz1i(NHi);

%.....
% Hitunga Kemiringan Tanggapan
%.....
Slope1 = (magLo-magHi)/(fLo-fHi);
Slo_al(count) = Slope1;
end
var_ali=Slo_al';
figure
plot(al,var_ali)
title ('Alpha vs Slope')
xlabel ('Alpha')
ylabel ('Slope')
grid

```

