

ESTIMASI KARAKTERISTIK OPERASIONAL GENERATOR SINKRON TIGA FASE MELALUI PEMODELAN PARAMETER BERBASIS METODE DERIVASI KONSTANTA WAKTU

Paulus Setiawan^{*)}, Femilia Refti Yunisa dan Bambang Sudibya

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Yogyakarta, Indonesia

^{*)}E-mail: paulussetiawan@stta.ac.id

Abstrak

Mesin sinkron adalah unit pembangkit utama dalam sistem tenaga listrik sehingga pemodelan mesin sinkron sangat penting untuk studi analisis sistem tenaga listrik. Dalam praktik operasional generator sinkron, seringkali data *manufactured* yang ada pada fisik generator tersebut sudah rusak atau hilang, sehingga sulit untuk mendapatkan atau menentukan parameter-parameter yang akan dihitung dalam simulasi dan analisis sistem tenaga listrik. Penelitian ini diawali dengan melakukan percobaan tanpa beban dan hubung singkat pada generator sinkron, kemudian memodelkan sistem persamaan generator sinkron kedalam bentuk sumbu dq. Sistem pemodelan sumbu dq yang digunakan bertujuan untuk menyederhanakan dan memudahkan dalam analisis karakteristik *response*. Selanjutnya melakukan *recording frequency response* baik dalam sumbu d maupun sumbu q dan membandingkannya antara metode standar dengan metode derivasi konstanta waktu. Pada saat keadaan awal generator sinkron tanpa beban, dengan metode derivasi konstanta waktu torsi elektromagnetik yang dihasilkan menjadi lebih rendah dengan selisih nilai maksimum sebesar 33 Nm. Kemudian pada saat generator sinkron melayani beban nominal, daya aktif yang dihasilkan pada keadaan *steady state* menjadi lebih rendah dengan selisih 35 W, dan arus stator juga menjadi 1,9 Amp lebih rendah jika dibandingkan dengan metode standar konstanta waktu.

Kata kunci: mesin sinkron , generator sinkron , konstanta , derivasi konstanta waktu , direct quadrature

Abstract

Synchronous engine is the main generating unit in electric power system so that synchronous machine modeling is very important for analysis study of electric power system. In the operational practice of synchronous generators, often the manufactured data on the physical generator has been damaged or lost, making it difficult to obtain or determine the parameters that will be calculated in the simulation and analysis of the electric power system. This research begins by conducting a no-load and short circuit experiment on a synchronous generator, then modeling a synchronous generator equation system in the form of the dq axis. The dq axis modeling system used aims to simplify and facilitate the analysis of response characteristics. Next, record the frequency response in both the d and q axes and compare it between the standard method and the time constant derivation method. At the initial state of the no-load synchronous generator, with the derivation method of the electromagnetic torque time constant, the resulting electromagnetic torque is lower with a maximum value difference of 33 Nm. Then when the synchronous generator serves a nominal load, the active power generated at steady state becomes lower by a difference of 35 W, and the stator current also becomes 1,9 Amps lower when compared to the standard time constant method.

Keywords: synchronous machine, synchronous generator, derivative time constant, direct quadrature.

1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik terdiri dari elemen pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban. Mesin sinkron adalah unit pembangkit utama dalam sistem tenaga listrik. Tujuan utama dari operasional sistem tenaga listrik ini adalah keamanan dan keandalan. Keamanan sistem tenaga listrik berarti bahwa sistem tenaga listrik berada dalam kondisi *steady state* dalam kendali aliran daya listrik. Pengoperasian sistem daya yang handal mengacu pada

kemampuannya untuk secara terus menerus mensuplai energi listrik yang dibutuhkan tanpa adanya gangguan walaupun berada pada kondisi yang tidak normal seperti terjadinya gangguan *switching* dan perubahan beban. Dalam kedua mode operasi tersebut, perilaku sistem tenaga listrik bergantung pada sistem kelistrikan dan proses elektromekanik dari mesin sinkron. Oleh karena itu, pemodelan mesin sinkron sangat penting untuk studi analisis sistem tenaga listrik.

Penelitian yang menyajikan metodologi umum, berdasarkan uji respons frekuensi dan memungkinkan perhitungan sistematis parameter rangkaian untuk generator sinkron *salient pole*. Dari pengujian koefisien fungsi transfer dipasang di kedua sumbu, kemudian koefisien harus sesuai dengan fungsi transfer simbolik yang diperoleh sebelumnya untuk menghitung parameter rangkaian. Jika perilaku dinamis yang diperoleh dengan parameter yang dipasang tidak cukup akurat, maka urutan rangkaian dapat ditingkatkan hingga mencapai solusi yang akurat [1].

Penelitian yang memperkirakan parameter transien dan sub-transien generator sinkron yang terkait dengan tes hubung singkat tiga fase mendadak dengan pendekatan metode Prony yang mengandalkan segmentasi waktu. Perbandingan antara pendekatan yang diusulkan dan metode grafis, seperti yang dijelaskan dalam standar IEEE-115. Data arus yang digunakan dalam penelitian ini telah dihasilkan dari persamaan karakteristik arus jangkar hubung singkat. Berdasarkan hasil penelitian ini adalah algoritma Prony merupakan alternatif yang cocok untuk metode grafis untuk estimasi parameter pada mesin sinkron yang memberikan perkiraan yang lebih akurat [2].

Penelitian yang mengidentifikasi parameter linier mesin sinkron *salient pole* pada *standstill test* dan dengan data tes respons frekuensi (SSFR). Penelitian ini menunjukkan bahwa parameter stabilitas untuk mesin sinkron dapat diperoleh dengan melakukan uji respons frekuensi dengan mesin dalam keadaan diam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menggunakan beberapa sinyal input-output, sesuai dengan uji setup yang direkomendasikan oleh standar IEEE Std 115, untuk mengidentifikasi struktur model dan parameter mesin sinkron kutub menonjol dari respons frekuensi data tes. Hasil dari penelitian dan pengujian ini adalah pada synchronous mesin 1,5 kVA/380V/1500 rpm dengan memperkirakan parameter operasional impedansi, atau dalam istilah lain, reaktansi dan konstanta waktu [3].

Penelitian yang mengidentifikasi frekuensi domain waktu untuk memperkirakan parameter linier dari mesin sinkron *salient pole* pada saat *standstill test*. Tujuan dari penelitian ini adalah menggunakan beberapa sinyal input untuk mengidentifikasi struktur model dan parameter mesin sinkron *salient pole* dari data uji diam. Prosedurnya terdiri dari pendefinisian, pelaksanaan *standstill test* dan juga identifikasi struktur model. Hasil pengujian dilakukan pada mesin sinkron 1,5 kVA/380V/1500 rpm [4].

Kebaruan yang akan disajikan pada penelitian ini adalah adanya analisis pengujian generator sinkron pada saat percobaan keadaan awal tanpa beban dan pengujian generator sinkron pada saat berbeban. Kemudian *response* yang akan dianalisis adalah *response* arus stator, *response* torsi elektromagnetik, dan *response* daya aktif generator.

2. Metode

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan sebuah belitan medan dan satu belitan *dampner* pada sumbu *d* dan bersama dua belitan *dampner* pada sumbu *q*. Ini akan membantu untuk menentukan $X_d(p)$, $X_q(p)$, dan $G(p)$ untuk menjelaskan tipe rotor sebelum pendekatan penggabungan parameter untuk diturunkan dari pengukuran data frekuensi *response*. Untuk maksud tersebut maka perlu memperhatikan rangkaian ekuivalen pada Gambar yang dapat membantu dalam menurunkan persamaan masukan impedansi pada rangkaian rotor dalam bentuk.

$$Z_{qr}(s) = R_{eq} \frac{(1 + \tau_{qa}s)(1 + \tau_{qb}s)}{(1 + \tau_{Qa}s)} \quad (1)$$

$$R_{eq} = \frac{r'_{kq1} r'_{kq2}}{r'_{kq1} + r'_{kq2}} \quad (2)$$

$$\tau_{qa} = \frac{X'_{lkq1}}{\omega_b r'_{kq1}} \quad (3)$$

$$\tau_{qb} = \frac{X'_{lkq2}}{\omega_b r'_{kq2}} \quad (4)$$

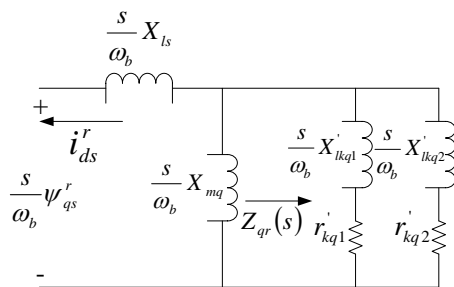
$$\tau_{Qa} = \frac{X'_{lkq1} + X'_{lkq2}}{\omega_b (r'_{kq1} + r'_{kq2})} = R_{eq} \left(\frac{\tau_{qa}}{r'_{kq2}} + \frac{\tau_{qb}}{r'_{kq1}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{sX_q(s)}{\omega_b} = \frac{sX_{ls}}{\omega_b} + \frac{(sX_{mq} / \omega_b) Z_{qr}(s)}{Z_{qr}(s) + (sX_{mq} / \omega_b)} \quad (6)$$

Seperti pada Gambar (1), penyelesaian persamaan $X_q(s)$ sebagai impedansi untuk dua belitan damper pada sumbu-q, dapat dinyatakan dengan persamaan.

$$X_q(s) = X_q \frac{1 + (\tau_{q4} + \tau_{q5})s + \tau_{q4}\tau_{q6}s^2}{1 + (\tau_{q1} + \tau_{q2})s + \tau_{q1}\tau_{q3}s^2} \quad (7)$$

$$\text{dimana } \tau_{q1} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq1}} (X'_{lkq1} + X_{mq}) \quad (8)$$



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen dengan dua belitan damper pada sumbu quadrature [13]

$$\tau_{q2} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq2}} (X'_{lkq2} + X_{mq}) \quad (9)$$

$$\tau_{q3} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X'_{lkq1}}{X_{mq} + X'_{lkq1}} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{q4} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq1}} \left(X'_{lkq1} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{q5} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (12)$$

$$\tau_{q6} = \frac{1}{\omega_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lkq1}}{X_{mq} X_{ls} + X_{mq} X'_{lkq1} + X_{ls} X'_{lkq1}} \right) \quad (13)$$

Impedansi $X_d(s)$ pada sumbu- d dapat dihitung untuk belitan medan dan belitan damper dengan prosedur yang sama. Untuk persamaan yang dapat diturunkan dari Gambar 2a. adalah

$$Z_{dr}(s) = R_{ed} \frac{(1 + \tau_{da}s)(1 + \tau_{db}s)}{(1 + \tau_{Da}s)} \quad (14)$$

dimana $R_{ed} = \frac{r'_{fd} r'_{kd}}{r'_{fd} + r'_{kd}}$ (15)

$$\tau_{da} = \frac{X'_{lfd}}{\omega_b r'_{fd}} \quad (16)$$

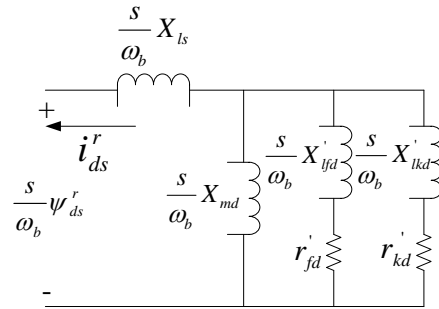
$$\tau_{db} = \frac{X'_{lkd}}{\omega_b r'_{kd}} \quad (17)$$

$$\tau_{Da} = \frac{X'_{lfd} + X'_{lkd}}{\omega_b (r'_{fd} + r'_{kd})} = R_{ed} \left(\frac{\tau_{da}}{r'_{kd}} + \frac{\tau_{db}}{r'_{fd}} \right) \quad (18)$$

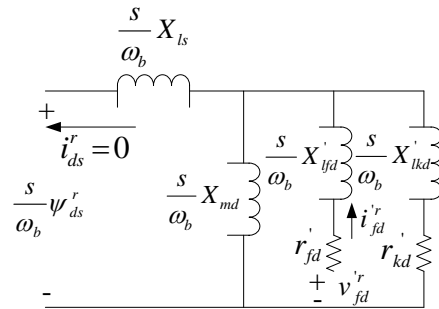
Operational impedansi untuk belitan medan dan belitan damper pada sumbu- d dapat dihasilkan dengan menyesuaikan v'_{fd} sampai menjadi nol dan mengikuti prosedur yang sama pada sumbu- q . Persamaan berikutnya menjadi

$$X_d(s) = X_d \frac{1 + (\tau_{d4} + \tau_{d5})s + \tau_{d4}\tau_{d6}s^2}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (19)$$

$$\tau_{d1} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (20)$$



(a) Kalkulasi $X_d(s)$; $v'_{fd} = 0$



(b) Kalkulasi $G(s)$; $i'_ds = 0$

Gambar 2. Perhitungan $X_d(s)$ dan $G(s)$ belitan dua rotor pada sumbu d [13]

$$\tau_{d2} = \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} (X'_{lkd} + X_{md}) \quad (21)$$

$$\tau_{d3} = \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X_{md} + X'_{lfd}} \right) \quad (22)$$

$$\tau_{d4} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (23)$$

$$\tau_{d5} = \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (24)$$

$$\tau_{d6} = \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls} X'_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{md} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (25)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam praktik operasional generator sinkron, seringkali data *manufactured* yang ada pada fisik generator tersebut sudah rusak atau hilang, sehingga sulit untuk mendapatkan atau menentukan parameter-parameter yang akan dihitung dalam simulasi dan analisis sistem tenaga listrik seperti pada belitan medan r'_{fd} , L'_{fd} kemudian pada belitan *dampers* r'_{kd} , L'_{kd} , r'_{kq1} , L'_{kq1} , r'_{kq2} , dan L'_{kq2} kesemuanya parameter tersebut belum diketahui.

Inti dari hasil dan pembahasan adalah analisis tanggapan *response* berupa analisis *Standstill Frequency Response* (SSFR), analisis generator sinkron pada saat keadaan awal dengan tanpa beban dan analisis generator sinkron pada saat keadaan berbeban. Untuk setiap analisis pembahasan dalam generator sinkron, analisis dilakukan dalam parameter-parameter seperti response arus stator (i_s), response pada torsi elektromagnetik (T_e), dan response pada daya aktif (P_{out}).

Untuk jalannya penelitian sebuah generator sinkron 4 kutub 3 fase, 600 VA, 220 V, 50 Hz, 1500 Rpm, memiliki pengelompokan induktansi dan resistansi dengan belitan stator dan rotor adalah:

- Melakukan percobaan generator sikron beban nol (tanpa beban) dan percobaan hubung singkat seperti pada Tabel 1 dan Gambar 3

Tabel 1. Hasil percobaan generator sinkron tanpa beban

Percobaan Generator Sinkron Tanpa beban	
Arus Medan Penguat I_f (mAmp)	Tegangan Terminal per fasa (Volt)
10	14
20	26
40	51
60	77
80	100
100	120
125	145
150	160
200	182
250	195
300	200
350	210
400	214
450	218

- Mencari nilai parameter $R_s(\Omega)$ dan $L_s(H)$ adalah

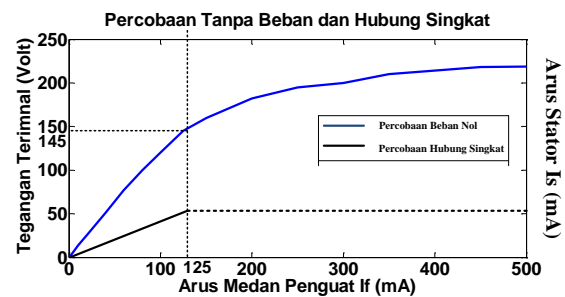
$$r_s = \frac{8V}{0,5A} = 16\Omega \text{ (saat percobaan tegangan searah pada belitan stator).}$$

- Mencari nilai parameter $R_s(\Omega)$ dan $L_s(H)$ adalah

$$r_s = \frac{8V}{0,5A} = 16\Omega \text{ (saat percobaan tegangan searah pada belitan stator).}$$

Tabel 2. Hasil percobaan generator sinkron hubung singkat

Percobaan Generator Sinkron Hubung Singkat	
Arus Medan Penguat I_f (mAmp)	Arus Stator I_a (Amp)
10	1,21
20	2,15
40	4,05
60	6,51
80	8,75
100	10,71
125	13,00



Gambar 3. Grafik hasil percobaan generator sinkron beban nol dan hubung singkat

- Mencari nilai parameter $R_s(\Omega)$ dan $L_s(H)$ adalah

$$r_s = \frac{8V}{0,5A} = 16\Omega \text{ (saat percobaan tegangan searah pada belitan stator).}$$

$$X_{ls}(\Omega) = \frac{\text{Tegangan rangkaian terbuka (V)}}{\sqrt{3} \cdot \text{Arus hubung singkat (Amp)}} \quad (26)$$

$$X_{ls}(\Omega) = \frac{145V}{\sqrt{3} \cdot 13A} = 6,4397\Omega$$

$$L_s(H) = \frac{X_{ls}}{2\pi \cdot f} = \frac{6,4397}{2\pi \cdot 50} = 0,0205H$$

- Mencari nilai *base* stator dan rotor untuk mendapatkan nilai per unit adalah

$$3 \text{ fase VA base} = 600 \text{ VA}$$

$$E_{s_base}(RMS) = 220 / \sqrt{3} = 127,0171 \text{ v}$$

$$e_{s_base}(peak) = \sqrt{2} \times 127,0171 = 179,6292 \text{ v}$$

$$I_{s_base}(RMS) = \frac{600}{3 \times 127,0171} = 1,5746 \text{ Amp}$$

$$i_{s_base}(peak) = \sqrt{2} \times 1,5746 = 2,2268 \text{ Amp}$$

$$Z_{s_base} = \frac{127,0171}{1,5746} = 80,6663\Omega$$

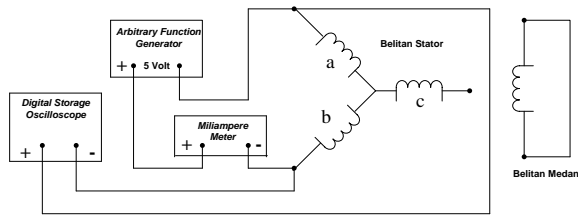
$$\omega_{base} = 2\pi \times 50 = 314 \text{ rad/sec}$$

$$L_{s_base} = \frac{80,6663}{314} = 0,2569 \text{ H}$$

$$\text{Nilai } r_s (pu) = \frac{r_s (\Omega)}{Z_{s-base} (\Omega)} = \frac{16}{80,6663} = 0,1983 pu$$

$$\text{Nilai } L_s (pu) = \frac{L_s (H)}{L_{s-base} (H)} = \frac{0,0205}{0,2569} = 0,0798 pu$$

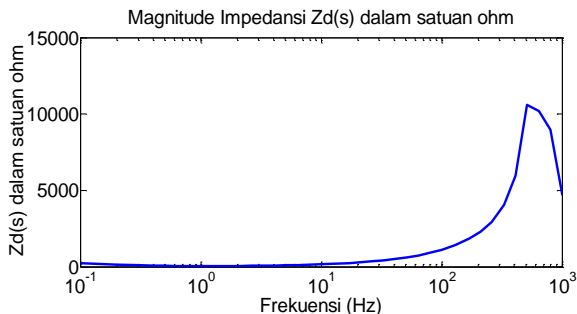
6. Melakukan percobaan dan pengukuran *frequency response* dalam d - axis seperti pada Gambar 4, 5, 6, Tabel 3, dan Tabel 4.



Gambar 4. Percobaan recording frequency response dalam d - axis

Tabel 3. Magnitude impedansi $Z_d(s)$ dalam satuan ohm

Frekuensi (Hz)	$v_{input} (V)$	$v_{output} (V)$	$I_{output} (mA)$	$Z_d (\Omega)$
1000	5	5,28	1,13	4.672,57
170	5	5,20	2,81	1.850,53
130	5	5,20	3,63	1.432,51
100	5	5,12	4,63	1105,83
17	5	4,72	19,07	247,5091
13	5	4,48	23,02	194,6134
10	5	4,16	26,48	157,0997
1,7	5	2,16	52,22	41,3635
1,3	5	2,00	50,55	39,5648
1	5	1,92	44,64	43,0107
0,3	5	1,68	17,53	95,8357
0,2	5	1,68	11,13	150,9433
0,1	5	1,68	6,92	242,7746



Gambar 5. Magnitude impedansi $Z_d(s)$ dalam satuan ohm

7. Mencari nilai $L_d(s)$ dalam per unit didapatkan dengan:

$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_s}{s} \quad (27)$$

$$L_d(s) pu = \frac{L_d(s)}{Z_{s-base}} pu \quad (28)$$

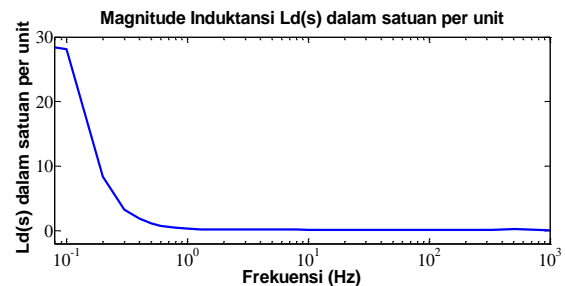
$$L_d = 28,1127 pu; \frac{1}{\tau_{d0}} = 0,1 Hz; \frac{1}{\tau_d} = 25 Hz$$

$$L'_d = 0,208 pu; \frac{1}{\tau_d} = 2,2 Hz; L_s = 0,0798 pu$$

$$L''_d = 0,13 pu; \frac{1}{\tau_{d0}} = 20 Hz$$

Tabel 4. Magnitude induktansi $L_d(s)$ dalam satuan per unit

Frekuensi (Hz)	$v_{output} (V)$	$I_{output} (mA)$	$Z_d (\Omega)$	$L_d (pu)$
1000	5,28	1,13	4.672,57	0.05773
170	5,20	2,81	1.850,53	0.1338
130	5,20	3,63	1.432,51	0.1351
100	5,12	4,63	1105,83	0.1351
17	4,72	19,07	247,51	0.1688
13	4,48	23,02	194,61	0.1703
10	4,16	26,48	157,099	0.1749
1,7	2,16	52,22	41,36	0.1849
1,3	2,00	50,55	39,56	0.2247
1	1,92	44,64	43,01	0.3348
0,3	1,68	17,53	95,84	3,2990
0,2	1,68	11,13	150,94	8,3643
0,1	1,68	6,92	242,77	28,1127



Gambar 6. Magnitude induktansi $L_d(s)$ dalam satuan (pu)

7. Mencari nilai parameter $r'_{fd}, L'_{fd}, r'_{kd}, L'_{kd}$

$$L_{ad} = L_d - L_s = 28,0329 pu \quad (29)$$

$$L'_d = L_s + \frac{L_{ad} \times L'_{fd}}{L_{ad} + L'_{fd}}; L_{fd} = 0,1288 pu \quad (30)$$

$$L''_d = L_s + \frac{L_{ad} \times L'_{fd} \times L'_{kd}}{L_{ad} \times L'_{fd} + L_{ad} \times L'_{kd} + L'_{fd} \times L'_{kd}} \quad (31)$$

$$L'_{kd} = 0,0825 pu$$

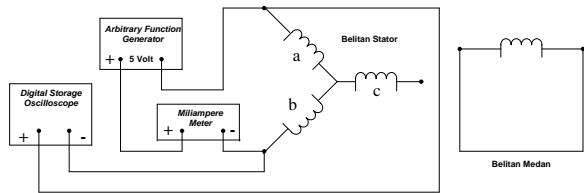
$$\tau'_{d0} = \frac{1}{0,1Hz} = 10s; \tau'_{d0} = \frac{L_{ad} + L'_{fd}}{r'_{fd}} \quad (32)$$

$$r'_{fd} = 0,00897 pu$$

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{20Hz} = 0,05s;$$

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{r'_{kd}} \left(L'_{kd} + \frac{L_{ad} \times L'_{fd}}{L_{ad} + L'_{fd}} \right); r'_{kd} = 0,0134 pu \quad (33)$$

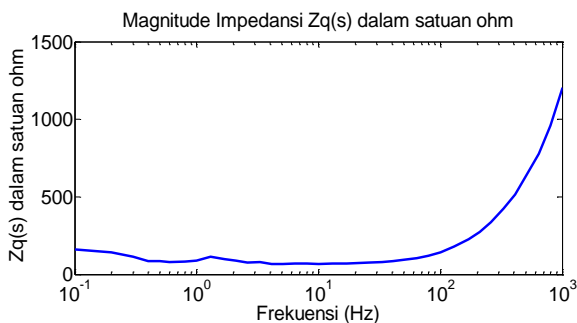
8. Melakukan percobaan dan pengukuran *frequency response* dalam q – axis seperti pada Gambar 7, 8, 9, Tabel 5, dan Tabel 6.



Gambar 7. Percobaan recording frequency response dalam q - axis

Tabel 5. Magnitude impedansi $Z_q(s)$ dalam satuan ohm

Frekuensi (Hz)	$v_{input}(V)$	$v_{output}(V)$	$I_{output}(mA)$	$Z_q(\Omega)$
1000	5	5,20	4,32	1.203,70
170	5	4,56	19,98	228,23
130	5	4,24	23,56	179,97
100	5	3,84	26,84	143,07
17	5	2,56	36,08	70,9534
13	5	2,56	36,42	70,2910
10	5	2,48	36,36	68,2068
1,7	5	2,20	22,18	99,1885
1,3	5	2,12	18,33	115,66
1	5	2,04	25,64	89,5632
0,3	5	1,76	15,46	113,84
0,2	5	1,76	12,30	143,09
0,1	5	1,76	10,93	161,02



Gambar 8. Magnitude impedansi $Z_q(s)$ dalam satuan ohm

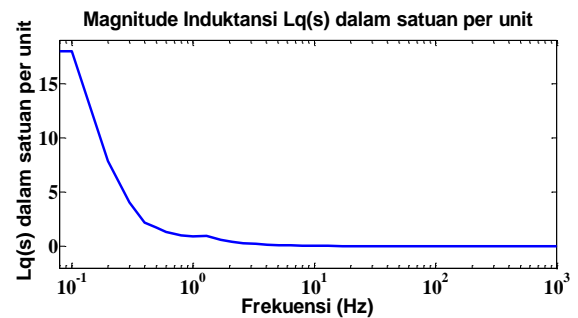
9. Mencari nilai $L_q(s)$ dalam per unit didapatkan dengan:

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_s}{s} \quad (34)$$

$$L_q(s) pu = \frac{L_q(s)}{Z_{s-base}} pu \quad (35)$$

Tabel 6. Magnitude induktansi $L_q(s)$ dalam satuan per unit

Frekuensi (Hz)	$v_{output}(V)$	$I_{output}(mA)$	$Z_q(\Omega)$	$L_q(pu)$
1000	5,20	4,32	1.203,71	0,0147
170	4,56	19,98	228,23	0,0155
130	4,24	23,56	179,97	0,0156
100	3,84	26,84	143,07	0,0157
17	2,56	36,08	70,95	0,0400
13	2,56	36,42	70,29	0,0518
10	2,48	36,36	68,27	0,0647
1,7	2,20	22,18	99,19	0,6066
1,3	2,12	18,33	115,66	0,9503
1	2,04	25,64	89,563	0,9119
0,3	1,76	15,46	113,84	4,0431
0,2	1,76	12,30	143,09	7,8775
0,1	1,76	10,93	161,02	17,9783



Gambar 9. Magnitude induktansi $L_q(s)$ dalam satuan per unit

$$L_q = 17,9783 pu; \frac{1}{\tau'_{q0}} = 0,1Hz; \frac{1}{\tau_q} = 6,25Hz$$

$$L'_q = 0,2376 pu; \frac{1}{\tau_q} = 1,75Hz; L_s = 0,0798 pu$$

$$L''_q = 0,11 pu; \frac{1}{\tau''_{q0}} = 5,88Hz$$

10. Mencari nilai parameter $r'_{kq1}, L'_{kq1}, r'_{kq2}, L'_{kq2}$

$$L_{aq} = L_q - L_s = 17,8985 pu \quad (36)$$

$$L'_q = L_s + \frac{L_{aq} \times L'_{kq1}}{L_{aq} + L'_{kq1}}; L_{kq1} = 0,1592 pu \quad (37)$$

$$L''_q = L_s + \frac{L_{aq} \times L'_{kq1} \times L'_{kq2}}{L_{aq} \times L'_{kq1} + L_{aq} \times L'_{kq2} + L'_{kq1} \times L'_{kq2}} \quad (38)$$

$$L'_{kq2} = 0,0374 pu$$

$$\tau'_{q0} = \frac{1}{0,1 Hz} = 10s$$

$$\tau'_{q0} = \frac{L_{aq} + L'_{kq1}}{r'_{kq1}}; r'_{kq1} = 00,00575 pu \quad (39)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{5,88 Hz} = 0,17s$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{r'_{kq2}} \left(L'_{kq2} + \frac{L_{aq} \times L'_{kq1}}{L_{aq} + L'_{kq1}} \right) \quad (40)$$

$$r'_{kq2} = \frac{0,1952}{0,17 \times 314} = 0,00366 pu$$

$$r_s = 0,1983 pu; L_s = 0,0798 pu;$$

$$L_{ad} = 28,0329 pu; L_{aq} = 17,8985 pu;$$

$$L'_{fd} = 0,1288 pu; r'_{fd} = 0,00897 pu;$$

$$L'_{kd} = 0,0825 pu; r'_{kd} = 0,0134 pu;$$

$$L'_{kq1} = 0,1592 pu; r'_{kq1} = 0,00575 pu;$$

$$L'_{kq2} = 0,0374 pu; r'_{kq2} = 0,00366 pu.$$

11. Mencari nilai parameter konstanta waktu

$\tau'_{d0}, \tau''_{d0}, \tau'_d, \tau''_d$ berdasarkan pada persamaan (20) sampai (25) adalah

$$\tau_{1d} = 9,9985s; \tau_{2d} = 6,6821s; \tau_{3d} = 0,0501s$$

$$\tau_{4d} = 0,074s; \tau_{5d} = 0,0385s; \tau_{6d} = 0,0313s$$

$$L'_d = L_d \left(\frac{\tau_{4d} + \tau_{5d}}{\tau_{1d} + \tau_{2d}} \right) = 0,1896 pu \quad (41)$$

$$\tau'_{d0} = \tau_{1d} + \tau_{2d}; \tau'_{d0} = 16,6806s \quad (42)$$

$$\tau''_{d0} = \frac{\tau_{1d} \times \tau_{3d}}{\tau_{1d} + \tau_{2d}} s; \tau''_{d0} = 0,03003s \quad (43)$$

$$\tau'_d = \tau_{4d} + \tau_{5d}; \tau'_d = 0,1125s \quad (44)$$

$$\tau''_d = \frac{\tau_{6d}}{\left(1 + \frac{\tau_{5d}}{\tau_{4d}} \right)} s; \tau''_d = 0,0206s \quad (45)$$

12. Mencari nilai parameter konstanta waktu $\tau'_{q0}, \tau''_{q0}, \tau'_q, \tau''_q$ berdasarkan pada persamaan (8) sampai (13) adalah

$$\tau_{1q} = 10,0015s; \tau_{2q} = 15,5775s; \tau_{3q} = 0,1698s$$

$$\tau_{4q} = 0,1322s; \tau_{5q} = 0,1017s; \tau_{6q} = 0,0787s$$

$$L'_q = L_q \left(\frac{\tau_{4q} + \tau_{5q}}{\tau_{1q} + \tau_{2q}} \right) = 0,1644 pu \quad (46)$$

$$\tau'_{q0} = \tau_{1q} + \tau_{2q} = 25,579s \quad (47)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{\tau_{1q} \times \tau_{3q}}{\tau_{1q} + \tau_{2q}} = 0,0664s \quad (48)$$

$$\tau'_q = \tau_{4q} + \tau_{5q} = 0,2339s \quad (49)$$

$$\tau''_q = \frac{\tau_{6q}}{\left(1 + \frac{\tau_{5q}}{\tau_{4q}} \right)} = 0,0445s \quad (50)$$

Tabel 7. Hasil perhitungan dan perbandingan

Parameter	Standar Konstanta Waktu	Derivasi Konstanta Waktu
D - axis		
L'_d	0,208 pu	0,1686 pu
τ'_{d0} (open circuit)	10 s	16,6806 s
τ''_{d0} (open circuit)	0,05 s	0,03 s
τ'_d (short circuit)	0,4545 s	0,1125 s
τ''_d (short circuit)	0,04s	0,0206 s
Q - axis		
L'_q	0,2376 pu	0,1644 pu
τ'_{q0} (open circuit)	10 s	25,579s
τ''_{q0} (open circuit)	0,1701 s	0,0664 s
τ'_q (short circuit)	0,5714 s	0,2339 s
τ''_q (short circuit)	0,16 s	0,0445 s

13. Menentukan persamaan fungsi alih (*transfer function*) $L_d(s)$ dan $L_q(s)$

Dengan menggunakan data dari Tabel 3.6, dapat ditentukan persamaan dari fungsi alih (*transfer function*) $L_d(s)$ dan $L_q(s)$ dengan menggunakan

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + s\tau'_d)(1 + s\tau''_d)}{(1 + s\tau'_{d0})(1 + s\tau''_{d0})} \quad (51)$$

$$L_d(s) = 28,1127 \frac{(1+s0,4545)(1+s0,04)}{(1+s10)(1+s0,05)} \quad \text{untuk}$$

standar konstanta waktu

$$L_d(s) = 28,1127 \frac{(1+s0,1125)(1+s0,0206)}{(1+s16,6806)(1+s0,03)} \quad \text{untuk}$$

derivasi konstanta waktu

$$L_q(s) = L_q \frac{(1+s\tau_q')(1+s\tau_q'')}{(1+s\tau_{q0}') (1+s\tau_{q0}'')} \quad (52)$$

$$L_q(s) = 17,9783 \frac{(1+s0,5714)(1+s0,16)}{(1+s10)(1+s0,1701)} \quad \text{untuk}$$

standar

konstanta

waktu

$$L_q(s) = 17,9783 \frac{(1+s0,2339)(1+s0,0445)}{(1+s25,579)(1+s0,0664)} \quad \text{untuk}$$

derivasi konstanta waktu

14. Mengulang kembali langkah nomor 6 dan nomor 9.

Langkah ini dimaksudkan untuk mendapatkan parameter-parameter generator sinkron setelah konstanta waktu dan derivasinya dihitung. Mencari nilai derivasi dari parameter $r'_{fd}, L'_{fd}, r'_{kd}, L'_{kd}$:

$$L_{ad} = 28,1127 - 0,0798 = 28,0329 pu$$

$$L'_d \text{ (nilai derivasi table 3.6)}$$

$$0,1686 = 0,0798 + \frac{28,0329 \times L'_{fd}}{28,0329 + L'_{fd}}$$

$$L'_{fd} = 0,0891 pu$$

$$L''_d = L_d \left(\frac{\tau'_d \tau''_d}{\tau'_{d0} \tau''_{d0}} \right) = 0,13 pu \quad (52)$$

Dengan menggunakan nilai $L''_d = 0,13 pu$, maka nilai

L'_{kd} dapat dihitung dengan

$$0,1254 = 1,08 \times L'_{kd}; L'_{kd} = 0,1161 pu$$

$$\tau'_{d0} = 16,6806 s; \tau'_{d0} = \frac{L_{ad} + L'_{fd}}{r'_{fd}}$$

$$r'_{fd} = \frac{28,122}{16,6801 \times 314} = 0,00537 pu$$

$$\tau''_{d0} = 0,03003 s$$

$$r'_{kd} = \frac{0,1713}{0,03003 \times 314} = 0,02175 pu$$

15. Mencari nilai derivasi dari parameter

$$r'_{kq1}, L'_{kq1}, r'_{kq2}, L'_{kq2}$$

$$L_{aq} = 17,9783 - 0,0798 = 17,8985 pu$$

$$1,51 = 17,8139 \times L'_{kq1}; L'_{kq1} = 0,08477 pu$$

$$L''_q = L_q \left(\frac{\tau'_q \tau''_q}{\tau'_{q0} \tau''_{q0}} \right) = 0,1102 pu \quad (53)$$

$$0,04613 = 0,9706 \times L'_{kq2}; L'_{kq2} = 0,04752 pu$$

$$\tau'_{q0} = 25,579 s; r'_{kq1} = \frac{17,9833}{25,579 \times 314} = 0,00224 pu$$

$$\tau''_{q0} = 0,0664 s; r'_{kq2} = \frac{0,1319}{0,0664 \times 314} = 0,00633 pu$$

Setelah semua langkah perhitungan dilakukan, maka dapat diketahui estimasi untuk parameter generator sinkron adalah sebagai berikut,

Generator sinkron 3 fase:

Daya: 600 VA (perkiraan setelah praktik)

Tegangan *Line to Line*: 220 V;

Kutub (*Poles*): 4; Kecepatan: 1500 r/min;

Frekuensi: 50 Hz (disamakan dengan sistem PLN)

Stator:

$$R_s = 0,1983 pu; L_s = 4,4893 pu;$$

$$Z_{s-base} = 80,6663 \Omega; L_{s-base} = 0,2569 H$$

Belitan medan:

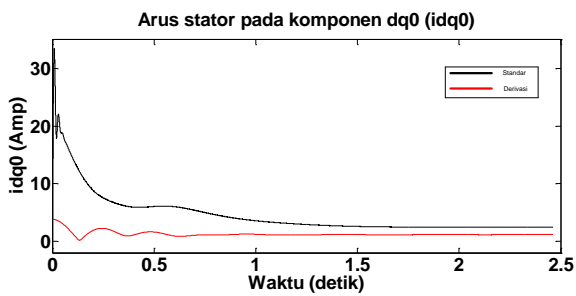
	Standar	Derivasi
r'_{fd}	0,00897 pu; 0,7236 Ω	0,00537 pu; 0,4332 Ω
L'_{fd}	0,1288 pu; 0,0331 H	0,0891 pu; 0,023 H

Belitan dampers:

	Standar	Derivasi
r'_{kd}	0,0134 pu; 1,0809 Ω	0,02175 pu; 1,7545 Ω
L'_{kd}	0,0825 pu; 0,0212 H	0,1161 pu; 0,0298 H
r'_{kq1}	0,00575 pu; 0,4638 Ω	0,00224 pu; 0,1807 Ω
L'_{kq1}	0,1592 pu; 0,0409 H	0,08477 pu; 0,0218 H
r'_{kq2}	0,00366 pu; 0,2952 Ω	0,00633 pu; 0,5106 Ω
L'_{kq2}	0,0374 pu; 0,0096 H	0,04752 pu; 0,0122 H

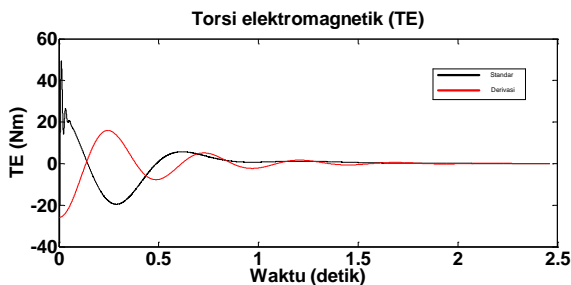
16. Melakukan pengujian generator sinkron pada saat percobaan keadaan awal tanpa beban

Pada Gambar 10. memperlihatkan karakteristik arus stator i_s (Amp) generator sinkron saat keadaan awal tanpa beban sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan awal, dengan metode standar ketika arus stator mencapai nilai maksimum sebesar 33,5 Ampere dengan rentang waktu selama 0,8 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 2,4 Ampere. Sedangkan dengan metode derivasi konstanta waktu, nilai arus stator maksimum sebesar 3,8 Ampere dengan rentang waktu selama 0,55 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 1,16 Ampere.



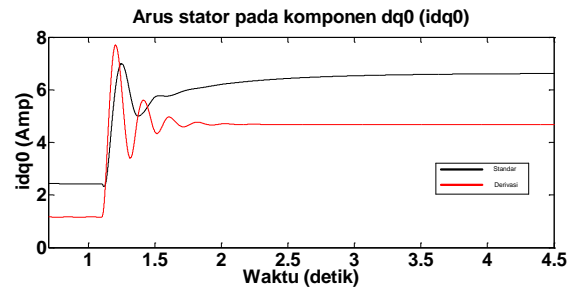
Gambar 10. Response arus stator i_s (Amp) saat keadaan awal tanpa beban

Pada Gambar 11. memperlihatkan karakteristik torsi elektromagnetik T_e (Nm) generator sinkron saat keadaan awal tanpa beban sampai dengan pada saat kondisi *steady state*. Pada saat keadaan awal, dengan metode standar ketika torsi elektromagnetik mencapai nilai maksimum sebesar 49 Nm dengan rentang waktu selama 0,86 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 0 Nm. Sedangkan dengan metode derivasi konstanta waktu, nilai torsi elektromagnetik maksimum sebesar 16 Nm dengan rentang waktu selama 0,78 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 0 Nm.



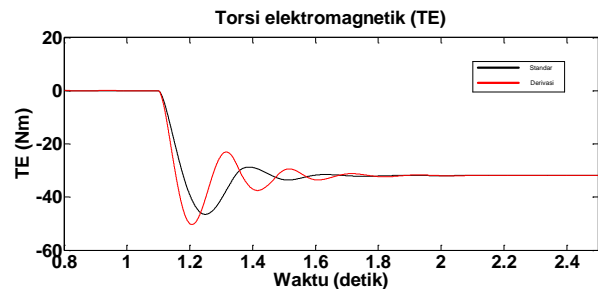
Gambar 11. Response torsi elektromagnetik T_e (Nm) saat keadaan awal tanpa beban

17. Melakukan pengujian generator sinkron pada saat percobaan berbeban

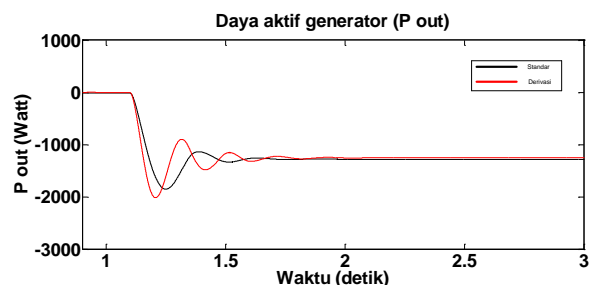


Gambar 12. Response arus stator i_s (Amp) pada saat berbeban

Pada Gambar 12. memperlihatkan karakteristik arus stator i_s (Amp) generator sinkron saat keadaan berbeban. Pada saat keadaan berbeban, dengan metode standar arus stator mencapai nilai maksimum sebesar 7 Ampere dengan rentang waktu selama 2,16 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 6,6 Ampere. Sedangkan dengan metode derivasi konstanta waktu, nilai arus stator maksimum mencapai 7,7 Ampere dengan rentang waktu selama 0,96 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 4,7 Ampere.



Gambar 13. Response torsi elektromagnetik T_e (Nm) pada saat berbeban



Gambar 14. Response daya aktif P_{out} (W) pada saat berbeban

Pada Gambar 13. memperlihatkan karakteristik torsi elektromagnetik T_e (Nm) generator sinkron saat keadaan berbeban. Pada saat keadaan berbeban, dengan metode standar torsi elektromagnetik mencapai nilai minimum sebesar 46,5 Nm dengan rentang waktu selama 1,7 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 31,8 Nm. Sedangkan dengan metode derivasi konstanta waktu, nilai torsi elektromagnetik minimum mencapai 50 Nm dengan rentang waktu selama 2 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 31,8 Nm.

Pada Gambar 14. memperlihatkan karakteristik daya aktif P_{out} (W) generator sinkron saat keadaan berbeban. Pada saat keadaan berbeban, dengan metode standar daya aktif mencapai nilai minimum sebesar 1850 W dengan rentang waktu selama 0,72 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 1285 W. Sedangkan dengan metode derivasi konstanta waktu, nilai daya aktif minimum mencapai 2016 W dengan rentang waktu selama 1,1 detik untuk mencapai keadaan *steady state* dengan nilai sebesar 1250 W.

4. Kesimpulan

Dari percobaan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh hasil dengan metode standar konstanta waktu dan derivasi konstanta waktu ini membuktikan bahwa *response* karakteristik generator sinkron dapat meredam osilasi sistem pada torsi elektromagnetik, kecepatan putaran rotor, arus stator, arus belitan medan, dan arus belitan *dampers*. Pada saat keadaan awal generator sinkron tanpa beban, dengan metode derivasi konstanta waktu torsi elektromagnetik yang dihasilkan menjadi lebih rendah dengan selisih nilai maksimum sebesar 33 Nm dengan selisih persentase 26,25 % . Kemudian pada saat generator sinkron melayani beban nominal, daya aktif yang dihasilkan pada keadaan *steady state* menjadi lebih rendah dengan selisih 35 W dengan selisih persentase 2,8 % , dan arus stator juga menjadi 1,9 Amp dengan selisih persentase 4,43 % lebih rendah jika dibandingkan dengan metode standar konstanta waktu. Dengan pencapaian arus stator dan daya aktif yang lebih rendah pada saat melayani beban nominal, sistem dengan metode derivasi konstanta waktu mempunyai efisiensi yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode standar.

Referensi

[1]. Bogarra, S., Garcia, A., Moreno-Eguilaz, M., & Riba, J. R. (2018, August). Detailed off-line parameter identification of Synchronous generator based on frequency response tests. In *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* (pp. 906-911). IEEE.

[2]. Santana, D. M. M., Ferreira, N. R., Costa, F. F., & Lima, A. C. D. C. (2015). A novel prony approach for synchronous generator parameter estimation.

[3]. Hasni, M., Touhami, O., Ibtouen, R., Fadel, M., & Caux, S. (2008). Synchronous machine parameter estimation by standstill frequency response tests. *JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING-BRATISLAVA*-, 59(2), 75.

[4]. Hasni, M., Djema, S., Touhami, O., Ibtouen, R., Fadel, M., & Caux, S. (2007). Synchronous machine parameter identification in frequency and time domain. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 4(1), 51-69.

[5]. Alves, E. F., Nøfland, J. K., Marafioti, G., & Mathisen, G. (2019, October). Online parameter identification of synchronous machines using Kalman filter and recursive least squares. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 7121-7128). IEEE.

[6]. Arjona, M. A., Cisneros-Gonzalez, M., & Hernandez, C. (2011). Development of a synchronous-generator experimental bench for standstill time-domain tests. *Journal of applied research and technology*, 9(2), 117-128.

[7]. Berhausen, S., & Paszek, S. (2016). Synchronous generator model parameter estimation based on Noisy dynamic waveforms. *Journal of Electrical Engineering*, 67(1), 21.

[8]. Firouzi, B. B., Jamshidpour, E., & Niknam, T. (2008). A new method for estimation of large synchronous generator parameters by genetic algorithm. *World Applied Sciences J*, 5, 326-331.

[9]. Gallehdari, Z., Dehghani, M., & Nikraves, K. (2014). Online state space model parameter estimation in synchronous machines. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 10(2), 124-132.

[10]. Heydt, G. T., Vittal, V., & Kyriakides, E. (2005). Estimation of synchronous generator parameters from on-line measurements. *Power Systems Engineering Research Center, Final Project Report PSERC Publication*, 05-36.

[11]. Karayaka, H. B., Keyhani, A., Heydt, G. T., Agrawal, B. L., & Selin, D. A. (2003). Synchronous generator model identification and parameter estimation from operating data. *IEEE transactions on energy conversion*, 18(1), 121-126.

[12]. Keyhani, A. (1992). Synchronous machine parameter identification. *Electric machines and power systems*, 20(1), 45-69.

[13]. Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. D. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems* (Vol. 75). John Wiley & Sons.

[14]. Kundur, P. (2007). Power system stability. *Power system stability and control*, 10.

[15]. Lee, C. C. (1976). *Synchronous Machine Modeling by Parameter Estimation*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.

[16]. Mahmoud, M. A., & Hughes, F. M. (1981). Synchronous Generator Parameter Estimation from Measured Short Circuit Currents. *IFAC Proceedings Volumes*, 14(2), 3103-3109.

[17]. Rengifo, C. F., Girón, C., Palechor, J., & Bravo M, D. A. (2021). Identification of a Synchronous Generator Parameters Using Recursive Least Squares and Kalman Filter. *Ciencia en Desarrollo*, 12(1), 13-21.

- [19]. Saied, S. A., Bathaee, S. M., Karrari, M., Rosehart, W., & Malik, O. P. (2006). IDENTIFICATION OF ELECTRIC PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATOR USING INPUT_OUTPUT DATA SET. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(7), 83-88.
- [20]. Xiao, Y., Zhou, L., Wang, J., & Yang, R. (2017). Finite element computation of transient parameters of a salient-pole synchronous machine. *Energies*, 10(7), 1015.

- ψ_{qs}^r : Quadrature axis flux linkage per second
 ψ_{ds}^r : Direct axis flux linkage per second
 X_{ls} : Stator reactance
 X_d : Direct axis synchronous reactance
 X_q : Quadrature axis synchronous reactance
 X_{md} : Direct axis mutual inductive reactance
 X_{mq} : Quadrature axis mutual inductive reactance
 X_{fd}' : Field reactance
 X_{kd}' : Direct axis damper reactance
 X_{kq1}' : Quadrature 1 axis damper reactance
 X_{kq2}' : Quadrature 2 axis damper reactance

Daftar Simbol

- i_s : RMS value of the Stator line current
 i_{fd}' : Field current
 i_{kd}' : Direct axis damper current
 i_{kq1}' : Quadrature 1 axis damper current
 i_{kq2}' : Quadrature 2 axis damper current
 L_s : Stator inductance
 L_d : Direct axis synchronous inductance
 L_q : Quadrature axis synchronous inductance
 L_{ad} : Direct axis mutual inductance
 L_{aq} : Quadrature axis mutual inductance
 L_{fd}' : Sum of the Field and mutual inductance
 L_{kd}' : Sum of the direct axis damper and mutual inductance
 L_{kq1}' : Sum of the Quadrature 1 axis damper and mutual inductance
 L_{kq2}' : Sum of the Quadrature 2 axis damper and mutual inductance
 r_s : Stator resistance
 r_{fd}' : Field resistance
 r_{kd}' : Direct axis damper resistance
 r_{kq1}' : Quadrature 1 axis damper resistance
 r_{kq2}' : Quadrature 2 axis damper resistance
 τ_{d0}' : Direct axis transient time constant (open circuit)
 τ_{d0}'' : Direct axis sub transient time constant (open circuit)
 τ_d' : Direct axis transient time constant (short circuit)
 τ_d'' : Direct axis sub transient time constant (short circuit)
 τ_{q0}' : Quadrature axis transient time constant (open circuit)
 τ_{q0}'' : Quadrature axis sub transient time constant (open circuit)
 τ_q' : Quadrature axis transient time constant (short circuit)
 τ_q'' : Quadrature axis sub transient time constant (short circuit)