

PERANCANGAN TOPOLOGI SISTEM PENYEARAH DAN INVERTER PENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR DI COAL MILL FAN INDARUNG 6 PT SEMEN PADANG

Bernard Kenny Poya^{*)}, Mochammad Facta dan M. Arfan

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

^{*)}E-mail:bernardkenpo@students.undip.ac.id ; bernardkenpo@gmail.com

Abstrak

Energi listrik masih menjadi unsur berjalannya proses di industri, baik produksi maupun distribusi. PT Semen Padang sebagai perusahaan manufaktur mengonsumsi energi listrik cukup besar untuk menunjang produksi dan pengelolaan semen. Sekitar 90% energi listrik di PT Semen Padang digunakan untuk menjalankan *electrical motor*, khususnya proses Coal Mill Indarung 6 dengan daya 2.000 kW dan energi 60.000 MWh. Solusi permasalahan penggunaan energi listrik yang besar ini yaitu menggunakan *driver* pengatur kecepatan motor pada proses *Coal Mill* menghisap udara untuk memproduksi *fine coal*. Perancangan topologi sistem penyearah (*converter*) dan pengendali (*inverter*) pengatur kecepatan motor induksi rotor sangkar menjadi rekomendasi mencapai efisiensi daya listrik sesuai kebutuhan operasional, berdasarkan simulasi dengan validasi tegangan dan arus *input* maupun *output* sistem yang dirancang. Dilakukan peninjauan keadaan aktual sistem, riset data, diskusi, menguji, mengevaluasi rancangan sistem berdasarkan analisis dan perhitungan. Simulasi menggunakan *software* PSIM dan MATLAB Simulink dengan standar acuan ABB dan WEG PT Semen Padang. Hasil simulasi MATLAB menunjukkan belitan trafo yang ideal yaitu hubung D/Y-D1/D11-D/Yng dan Y/D1-D1/D11-Y/D11 dengan rating 1.486,09kVA, Tegangan DC ideal sebesar 7.752 volt, 7.977 volt (*controlled*), dan 10.930 volt (*uncontrolled*) dengan harmonik sumber 0,06% (THDv) dan 21,32% (THDi), serta rangkaian VSI 3-level pengontrolan SPWM pengaturan frekuensi memperoleh daya lebih kecil dari operasinya.

Kata kunci: Energi listrik, motor induksi, driver, penyearah, inverter, PSIM, MATLAB

Abstract

Electrical energy crucial of processes in industry, production and distribution. PT Semen Padang as manufacturing company consumes electrical energy supporting the cement production and management. About 90% of electrical energy is used to run electrical motors, especially Coal Mill Indarung 6 process with power of 2,000 kW and energy of 60,000 MWh. Solution prior to problem using large electrical energy is to use a motor driver in Coal Mill process to absorb air producing fine coal. Design of the rectifier (converter) and controller (inverter) system topology for cage rotor induction motor speed regulator being recommendation to achieve electrical efficiency according to operational needs, based simulations with validation of input and output voltage and current of designed system. Reviewing the system state, data research, discussion, testing, evaluating system design based analysis and calculation. Simulations using PSIM and MATLAB Simulink software with ABB and WEG PT Semen Padang reference standards. MATLAB simulation results that the ideal transformer windings are D/Y-D1/D11-D/Yng and Y/D1-D1/D11-Y/D11 with rating of 1,486.09kVA, ideal DC voltages of 7,752 volts, 7,977 volts (controlled), and 10,930 volts (uncontrolled) with source harmonics of 0.06% (THDv) and 21.32% (THDi), and 3-level VSI circuit controlling SPWM frequency adjustmednts obtains less power than its operation.

Keywords: Electrical energy, induction motor, driver, converter, inverter, PSIM, MATLAB

1. Pendahuluan

Perkembangan infrastruktur pembangunan nasional membuat kebutuhan energi listrik di Indonesia semakin meningkat pada setiap sektor, salah satunya dari sektor

industri. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya mencatat di tahun 2023, konsumsi listrik per kapita mencapai 1.285 kWh dan di tahun 2024 ditargetkan mencapai 1.408 kWh/kapita akibat pemulihan pasca pandemi. PT Semen Padang sebagai perusahaan industri manufaktur menerapkan sistem jaringan listrik dengan

konsumsi energi yang cukup besar pada tiap prosesnya. Diketahui proses produksi semen memiliki 5 tahapan, yaitu penambangan dan penyimpanan material, penggilingan dan pencampuran material, homogenisasi hasil penggilingan material, pembakaran, dan penggilingan akhir hasil pembakaran. Data *annual report* PT Semen Padang mencatat peningkatan penjualan produksi semen secara spesifik dari 8.179.226 ton di tahun 2018, hingga 9.492.846 ton pada tahun 2022. Hal ini tentu meningkatkan kebutuhan energi listrik bagi PT Semen Padang. Kapasitas daya terpasang di sistem kelistrikan PT Semen Padang sebesar 91,2 MVA untuk menjalankan peralatan listrik pabrik Indarung 2 sampai 5, kebutuhan tambang, kebutuhan non pabrik, belum termasuk pabrik Indarung 6. Lebih dari 90% penggunaan energi listrik di PT Semen Padang digunakan untuk menjalankan beban motor.

Meninjau distrik Indarung 6 PT Semen Padang, terdapat proses *coal mill*, meliputi penggilingan, penghalusan, dan pengeringan *fine coal*. Proses sirkulasi gas panas ke sistem dan cerobong diatur oleh motor *mill ID fan* dengan mengisap gas panas. Saat ini kecepatan putar motor untuk mengisap udara bersifat tetap (*fix speed*), sehingga motor mengonsumsi daya listrik yang sama. Data operasi mencatat konsumsi energi listrik pada *Coal Mill Fan P25* sebesar 931.998 kWh dan 1.565.681 kWh untuk *Coal Mill Process* selama periode 1 bulan pada Oktober 2023. Besarnya konsumsi energi tersebut memunculkan inisiasi dalam merancang suatu sistem untuk meningkatkan efisiensi energi listrik guna menekan biaya produksi, salah satunya yaitu merancang topologi sistem pengatur kecepatan motor *ID fan* pada proses *coal mill* sesuai kebutuhan operasi. Topologi *driver* pengatur kecepatan motor menerapkan 3 subsistem, yaitu transformator 3 fasa, converter penyearah, dan inverter terkontrol. Tingkat pulsa dan *rating* pada rancangan sistem diharapkan membuat bentuk gelombang, menjadi lebih halus untuk kemudian diubah menyerupai bentuk sinusoidal murni sehingga motor dapat beroperasi dengan baik yang minim harmonik. Daya listrik yang dikonsumsi oleh sistem ini diharapkan dapat menekan energi listrik yang dihasilkan sebelumnya menjadi lebih sedikit dan menjadi rekomendasi bagi Iindarung 6 PT Semen Padang.

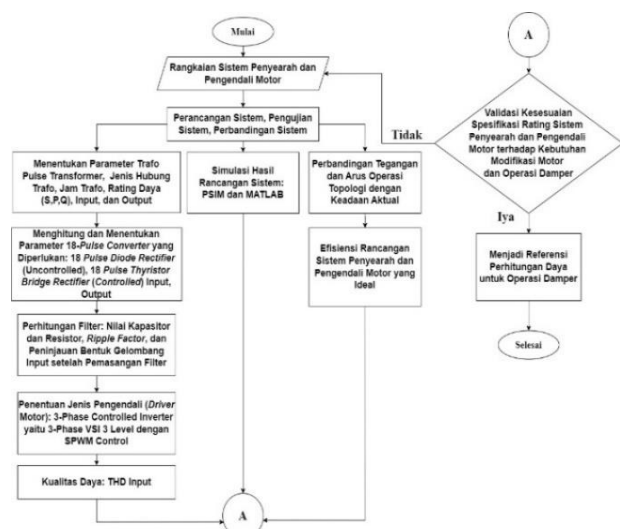
2. Metode

2.1. Tahapan Penelitian

Pengaturan kecepatan putaran motor ditunjang melalui sistem pengendali atau *drives system* [1] yang terdiri dari susunan dioda penyearah dan *inverter* pada *input* motor sehingga motor dapat menyesuaikan kecepatan putar berdasarkan kebutuhan operasi *coal mill*. Penerapan sistem pengendali motor berdasarkan perbandingan keadaan saat motor awalnya berkecepatan konstan kemudian dimodifikasi menjadi motor dengan kecepatan bervariasi.

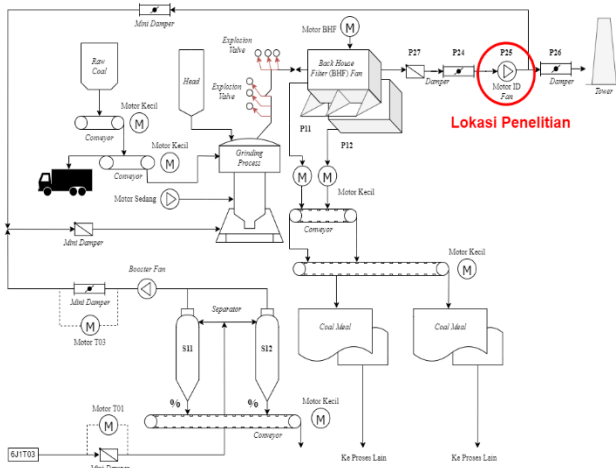
Tahapan perancangan topologi sistem dapat dilihat pada Gambar 1. Pertama, yaitu tahap perancangan sistem

dengan menentukan parameter trafo berdasarkan analisis pulsa trafo [2], jenis hubung, jam trafo [3], dan *rating* trafo. Dilanjutkan dengan merancang sistem konverter penyearah 18 pulsa [4] dengan perbandingan konverter terkontrol dan tidak terkontrol dalam menentukan tegangan keluaran DC yang ideal dengan harmonisa yang kecil. Kemudian analisis kapasitor untuk mengurangi *ripple* dan mencegah timbulnya harmonik yang besar di sisi *input* sumber. Sebelum terhubung dengan motor induksi hasil modifikasi, terlebih dahulu dilakukan perancangan subsistem inverter [5] melalui rangkaian VSI 3 level dengan teknik pengontrolan SPWM untuk memperoleh tegangan, arus, kecepatan, dan torsi yang ideal [6] bagi motor untuk beroperasi. Tahap akhir perancangan sistem yaitu pengecekan nilai THD *input* akibat pemasangan kapasitor [7]. Setiap penentuan perancangan dilakukan dengan perhitungan dan riset teori. Kedua, yaitu tahap pengujian sistem dengan menguji hasil parameter perhitungan dan analisis teori pada perancangan sistem untuk disimulasikan dengan bantuan *software* PSIM dan MATLAB Simulink. Pada tahap ketiga, hasil simulasi yang diperoleh sebagai acuan rancangan sistem yang disepakati kemudian dilakukan analisis perbandingan terhadap operasi aktual Indarung 6 PT Semen Padang, seperti perbandingan daya efisiensi yang diperoleh dari sistem yang dirancang terhadap operasi aktual. Hasil rancangan, pengujian, dan perbandingan sistem pada tahap keempat kemudian dievaluasi dan divalidasi berdasarkan hasil perhitungan parameter tiap subsistem yang ada (transformator, konverter, dan inverter) yang disesuaikan terhadap tujuan perancangan sistem secara khusus, yaitu kecilnya harmonik yang terbentuk di sisi sumber dan target pencapaian nilai tegangan dan arus yang sesuai bagi motor untuk kebutuhan operasi *dampner*. Hasil ini menjadi referensi analisis penghematan energi melalui daya listrik yang dihasilkan sistem.



Gambar 1. Diagram alir perancangan topologi sistem penyearah dan pengendali motor

Sistem pengoperasian dalam *Coal Mill* dan lokasi penelitian rancangan topologi sistem penyearah dan pengatur kecepatan motor dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir proses operasi coal mill

2.2. Perancangan Subsistem Trafo

Tegangan dan arus sumber dari trafo yang dirancang dapat dilihat berdasarkan acuan SLD *incoming* trafo 2 Indarung 6, ABB ACS5000, dan WEG pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter *input* trafo

Ref	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Frekuensi (Hz)
SLD Ind. 6	6.300	40.000	50
ACS5000	4.160 ~ 13.800	-	50
WEG	6.300 ~ 6.615	150,6~166,4	50

Tegangan dan arus *output* dari trafo yang dirancang dapat dilihat berdasarkan acuan SLD *incoming* trafo 2 Indarung 6, ABB ACS5000, dan WEG pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *output* trafo

Ref	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Frekuensi (Hz)
SLD Ind. 6	-	40	50
ACS5000	1.920 ~ 6.900	-	50
WEG	1.820	150,6~166,4	50

Meninjau tegangan dan arus yang diperoleh, dilakukan perbandingan tegangan (a) dan kumparan (n) berdasarkan jenis hubung dengan rumus:

$$a_{\Delta\Delta} = n = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (1)$$

$$a_{\Delta Y} = \frac{n}{\sqrt{3}} = \frac{V_{in}}{V_{out}\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$a_{\Delta Z} = \frac{2n}{3} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (3)$$

$$a_{Y\Delta} = n\sqrt{3} = \frac{V_{in}}{V_{out}\sqrt{3}} \quad (4)$$

Menerapkan prinsip *phase shifting* dapat dilakukan dengan hubungan perbandingan kumparan dan tegangan terhadap jam trafo yang diterapkan [8]. Keterkaitan tersebut dapat dibentuk melalui persamaan berikut.

Pada hubungan DY:

$$\text{Prim DY}_{1,5,9} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p\sqrt{3} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_B = V_p\sqrt{3} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_C = V_p\sqrt{3} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Prim DY}_{3,7,11} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p\sqrt{3} \angle 30^\circ \\ \vec{V}_B = V_p\sqrt{3} \angle -90^\circ \\ \vec{V}_C = V_p\sqrt{3} \angle 150^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Sec DY}_{1,5,9} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Sec DY}_{3,7,11} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle 30^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -90^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle 150^\circ \end{cases} \quad (8)$$

Dengan $V_p\sqrt{3}$ merupakan harga efektif tegangan per fasa pada primer sekaligus harga efektif tegangan antar fasa pada jala – jala.

Pada hubungan YD:

$$\text{Prim YD}_{1,5,9} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p \angle 0^\circ \\ \vec{V}_B = V_p \angle -120^\circ \\ \vec{V}_C = V_p \angle 120^\circ \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{Prim YD}_{11,7,3} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p \angle 0^\circ \\ \vec{V}_B = V_p \angle -120^\circ \\ \vec{V}_C = V_p \angle 120^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Sec YD}_{1,5,9} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p}{n} \angle 0^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p}{n} \angle -120^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p}{n}\sqrt{3} \angle 120^\circ \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Sec YD}_{11,7,3} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p}{n} \angle 0^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p}{n} \angle -120^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p}{n}\sqrt{3} \angle 120^\circ \end{cases} \quad (12)$$

Dengan V_p merupakan tegangan per fasa pada sisi primer. Pada hubungan DD:

$$\text{Prim DD}_{0,4,8} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p\sqrt{3} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_B = V_p\sqrt{3} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_C = V_p\sqrt{3} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Prim DD2,6,10} \begin{cases} \vec{V}_A = V_p\sqrt{3} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_B = V_p\sqrt{3} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_C = V_p\sqrt{3} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Sec DD0,4,8} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Sec DD2,6,10} \begin{cases} \vec{V}_a = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -30^\circ \\ \vec{V}_b = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle -150^\circ \\ \vec{V}_c = \frac{V_p\sqrt{3}}{n} \angle 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

Dengan $V_p\sqrt{3}$ merupakan harga efektif tegangan per fasa pada primer sekaligus harga efektif tegangan antar fasa pada jala – jala. Kelayakan sistem dalam menyalurkan daya listrik salah satunya dengan mempertimbangkan nilai faktor daya yang besar, dengan persamaan:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2)}} \quad (17)$$

Dengan P merupakan hasil pengukuran daya aktif (W) pada simulasi, dan S merupakan hasil pengukuran daya semu (VA) berdasarkan penentuan rating trafo yang ideal. Tegangan dan arus rms yang terukur kemudian dilakukan analisis nilai rata rata (avg) dan peak to peak (pp) melalui:

$$V_{rms} = 0,707V_m \quad (18)$$

$$V_{avg} = 0,637V_m \quad (19)$$

$$V_{pp} = 2V_m \quad (20)$$

Untuk tegangan, dengan $V_m=V_p$. Sedangkan untuk arus:

$$I_{rms} = 0,707I_m \quad (21)$$

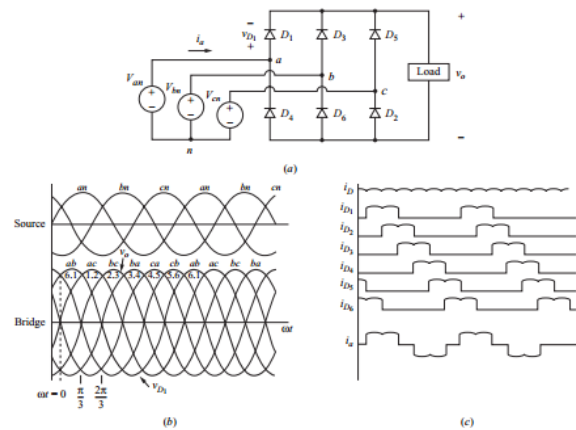
$$I_{avg} = 0,637I_m \quad (22)$$

$$I_{pp} = 2I_m \quad (23)$$

Untuk arus, dengan $I_m=I_p$.

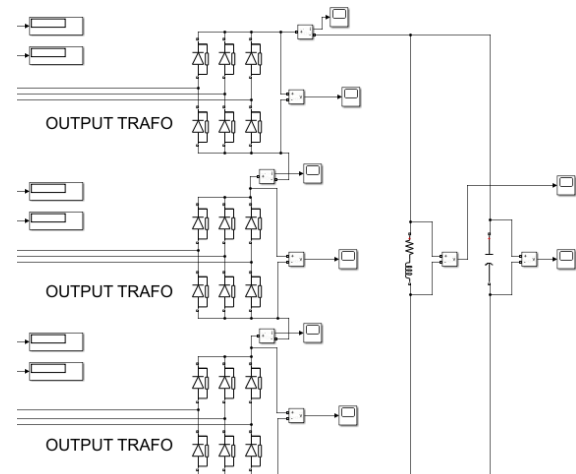
2.2.1 Konverter 18 Pulsa Tak Terkontrol (18-Pulse Diode Rectifier)

Umumnya penyearah 3 fasa digunakan di industri untuk menghasilkan tegangan dc dan arus dc untuk beban besar. Sumber tegangan 3 fasa yang dihasilkan terlihat seimbang dan memiliki urutan fasa a-b-c dan seterusnya [9]. Sumber dan dioda diasumsikan untuk ideal selama menganalisis sirkuit/ rangkaian. Konverter 18 pulsa tak terkontrol dapat dibentuk dari 3 unit rangkaian penyearah dioda 3 fasa jembatan penuh yang dihubung seri [10]. Dioda penyearah 3 fasa jembatan penuh dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Penyearah jembatan penuh 3 fasa (a); gelombang sumber dan output (b); arus untuk beban resistif (c)

Perancangan subsistem konverter 18 pulsa tak terkontrol pada simulasi MATLAB dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rancangan topologi uncontrolled 18-pulse converter

Tegangan output konverter 18 pulsa tak terkontrol diperoleh melalui persamaan:

$$V_o = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0,955V_{rms,L-L}\sqrt{2} \quad (24)$$

Dimana $V_{m,L-L}$ merupakan tegangan puncak (Vp) line to line dari sumber 3 fasa atau keluaran trafo, yang mana bernilai $\sqrt{2} V_{L-L,rms}$. Untuk arus output, diperoleh melalui:

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (25)$$

Dimana R merupakan nilai beban resistansi (Ω) keluaran konverter. Parameter analisis yang mendukung rancangan juga dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter penunjang converter 18 pulsa tak terkontrol

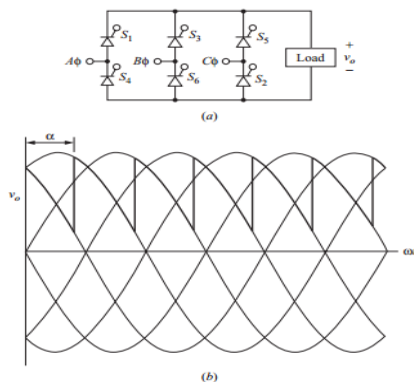
Parameter	Rumus
Peak Repetitive Reverse Voltage (V_{RRM})	$1,05V_{dc}$

Tabel 3. (lanjutan)

Parameter	Rumus
Peak Repetitive Reverse Voltage (V_{RRM})	$1,05V_{ac}$
Peak Repetitive Forward Current (I_{FRM})	$3,14I_{Fav}$
Diode Average Current (I_{Fav})	$0,333I_{dc}$
Diode RMS Current (I_{Frms})	$0,579I_{dc}$
Form Factor of Diode Current (I_{Frms}/I_{Fav})	1,74
Form Factor	1,0009
Ripple Factor	0,042
Output Ripple Frequency (fr)	$6fi$

2.2.2 Konverter 18 Pulsa Terkontrol (18-Pulse Thyristor Bridge Rectifier)

Output dari penyearah tiga fase dapat dikontrol dengan mengganti diode dengan *thyristor* yang terhubung dengan *firing angle*. Dengan tiristor yang dikontrol, konduksi tidak dimulai sampai sinyal gerbang diterapkan saat tiristor dalam bias maju. Dengan demikian, transisi tegangan *output* ke tegangan sumber *line-to-line* sesaat maksimum dapat ditunda, seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian penyearah 3 fase terkontrol (a); tegangan output untuk $\alpha = 45^\circ$ (b)

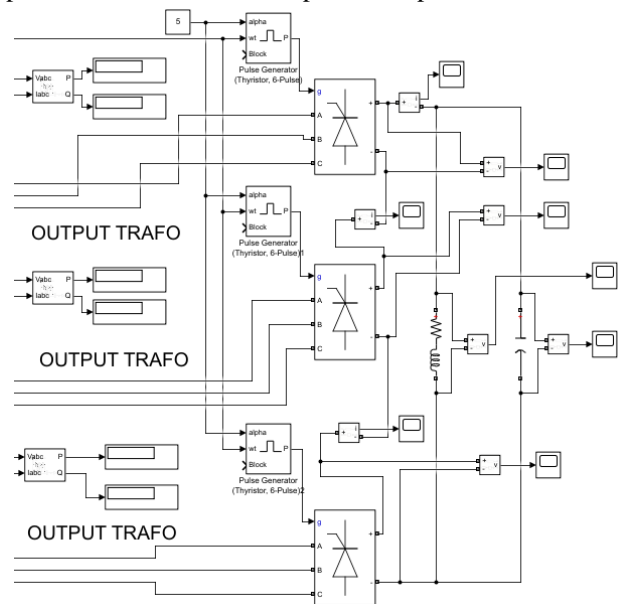
Tegangan *output* konverter 18 pulsa terkontrol diperoleh melalui persamaan:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (26)$$

$$V_o = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos\alpha \quad (27)$$

Di mana $V_{m,L-L}$ merupakan tegangan puncak (V_p) *line to line* dari sumber 3 fase atau keluaran trafo, yang mana bernilai $\sqrt{2} V_{L-L,rms}$. Untuk arus *output* subsistem konverter 18-pulsa terkontrol, persamaan yang digunakan sama dengan Persamaan (25) diatas.

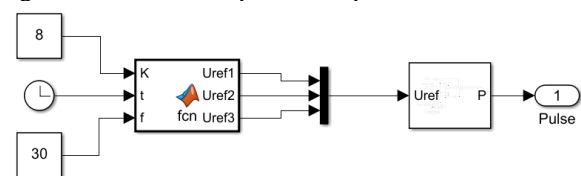
Perancangan subsistem konverter 18 pulsa tak terkontrol pada simulasi MATLAB dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rancangan topologi *controlled* 18-pulse converter

2.3. Perancangan Subsistem Inverter

Rangkaian inverter 3 fase umumnya digunakan untuk mengubah tegangan dan arus DC dari keluaran konverter penyearah menjadi tegangan dan arus AC [11]. Dalam teorema *variable speed* untuk motor induksi [12], kecepatan motor diatur berdasarkan pengontrolan frekuensi pada inverter. Teknik pengontrolan frekuensi yang digunakan adalah VSI 3 level [13], dengan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) [14] dengan pengaturan modulasi amplitude dan frekuensi. Subsistem pengontrolan SPWM dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. SPWM 3-level control subsystem

Tegangan dan arus yang dibutuhkan oleh motor *coal mill fan* P25 ditinjau melalui data *nameplate* motor P25, ABB ACS5000, dan operasi aktual motor pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter output *inverter*

Ref	Tegangan (V)	Arus (A)	Frekuensi (Hz)
Nameplate P25	6.000	200,5	50
ACS5000 Operasi	4.000 ~ 6.900	210	50
	6.330	130 ~ 136	50

Dalam menganalisis rangkaian VSI 3 level, jenis inverter yang digunakan adalah IGBT [15] dengan basis komponen

3-level bridge. Dilakukan analisis resistansi (R_s) dan kapasitansi snubber (C_s) dengan persamaan:

$$R_s = \frac{V_{dc}}{I_{peak}} \quad (28)$$

$$C_s = \frac{I_{peak}}{2\pi f V_{dc}} \quad (29)$$

Dengan I_{peak} merupakan nilai arus puncak keluaran konverter hasil simulasi, V_{dc} merupakan nilai output konverter, dan f_c adalah nilai frekuensi nominal (50 Hz). Analisis perhitungan filter pada *output* inverter diperoleh melalui:

$$L \leq \frac{0,03V_{peak}}{(2\pi f L_{-max})} \quad (30)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 L} \quad (31)$$

$$R_f = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (32)$$

Dengan V_{peak} merupakan nilai tegangan puncak keluaran konverter, f adalah nilai frekuensi nominal (50 Hz), f_c adalah frekuensi pembawa pengontrolan SPWM (4.050 Hz), V_{rms} dan I_{rms} merupakan tegangan nominal dan arus operasi motor *coal mill* P25. Rangkaian DC-Link yang terdiri dari resistor dan kapasitor dianalisis dengan rumus:

$$C = \frac{I_{dc}}{2\pi f_c \Delta V_{dc}} \quad (33)$$

$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (34)$$

Dengan I_{dc} merupakan arus *output rms* converter, f_c adalah frekuensi pembawa, V_{dc} adalah tegangan *output rms* konverter, dan ΔV_{dc} adalah THD *output* konverter.

2.4. Analisis Harmonik Sumber

Pencegahan harmonik sumber dapat dilakukan dengan menghitung nilai kapasitansi pada sisi filter konverter penyearah [16] dalam mencegah *ripple* yang besar di sisi *output*nya [17]. Nilai kapasitansi diperoleh melalui:

$$C = \frac{V_{f-f}^{sec}}{\sqrt{2} \cdot \omega L_s} \cos \alpha \quad (35)$$

Dimana V_{f-f}^{sec} adalah nilai tegangan rms fasa-fasa di sisi sekunder, pada terminal katup penyearah, α adalah sudut pengapian, dan L_s adalah nilai beban induktansi pada sisi *output* konverter.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Subsistem Transformator

Berdasarkan data parameter yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 yang disertai perhitungan parameter trafo aktual yang beroperasi, maka diperoleh tabel opsi konfigurasi trafo berdasarkan perbandingan tegangan dan

lilitan, yaitu sebagai berikut. Parameter perbandingan tegangan dan kumparan trafo dapat dilihat pada Gambar 5

Tabel 5. Parameter perbandingan tegangan dan kumparan trafo Opsi Konfigurasi berdasarkan Data Aktual

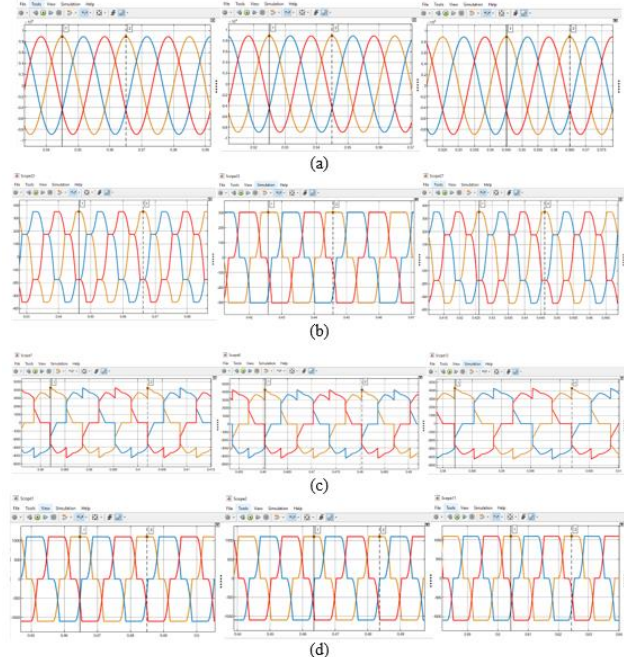
Jenis Hubung	Perbandingan Tegangan (a)	Perbandingan Lilitan (n)
$\Delta\Delta$	4:1 atau 3:1	4:1 atau 3:1
ΔY	2:1	4:1 atau 3:1
ΔZ	3:1 atau 2:1	4:1 atau 3:1
$Y\Delta$	7:1 atau 6:1	4:1 atau 3:1

Jenis hubung yang tersedia salah satunya adalah hubungan $Z\Delta$ pada simulasi MATLAB, namun opsi ΔZ sehingga opsi yang mungkin diaplikasikan yaitu $\Delta\Delta$, ΔY , dan $Y\Delta$. Meninjau parameter tersebut diperoleh jenis hubung yang tepat berdasarkan analisis jam trafo pada Tabel 6.

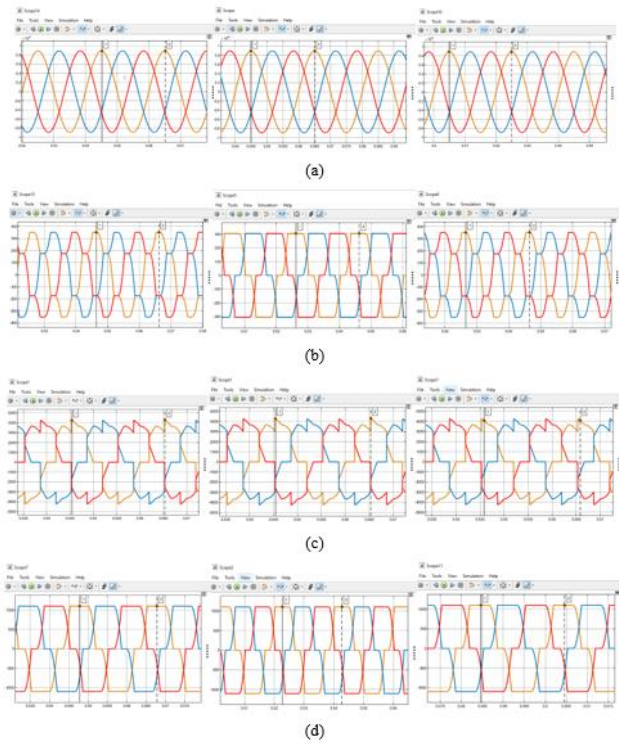
Tabel 6. Pilihan jenis hubung topologi subsistem trafo Variasi Jenis Hubung berdasarkan Jam Trafo

Variasi	Trafo 1	Trafo 2	Trafo 3
1	D1/Y (Dy11)	D1/D11 (Dd10)	D11/Yng (Dy7)
2	Y/D1 (Yd1)	D1/D11 (Dd10)	Y/D11 (Yd11)

Dilakukan uji tegangan dan arus yang ideal bagi trafo berdasarkan Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 4, diperoleh $V_{in} = 6.600$ volt dan $I_{in} = 130A$, dengan $S_{rating} = 1.486,09$ kVA. Gelombang tegangan dan arus berdasarkan jenis hubung dan *rating* dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Tabel analisis nilai rms, rata-rata (avg) dan *peak to peak* (pp) tegangan dan arus trafo ditunjukkan pada Tabel 7.



Gambar 8. Bentuk gelombang tegangan (a), arus (b) input trafo dan tegangan (c), arus (d) output trafo hubung D1/Y; D1/D11; D11/Yng



Gambar 9. Bentuk gelombang tegangan (a), arus (b) input trafo dan tegangan (c), arus (d) output trafo hubung Y/D1; D1/D11; Y/D11

Tabel 7. Parameter acuan tegangan dan arus output trafo menuju konverter penyearah

Ph	Vrms (kV)	Vavg (kV)	Vpp (kV)	Irms (A)	Iavg (A)	Ipp (A)
R	2,812	2,553	17,82	912,5	822,03	2.215
S	2,815	2,536	17,82	861,1	775,72	2.217
T	2,911	2,622	17,82	882,7	795,18	2.215

3.2. Subsistem Konverter Penyearah

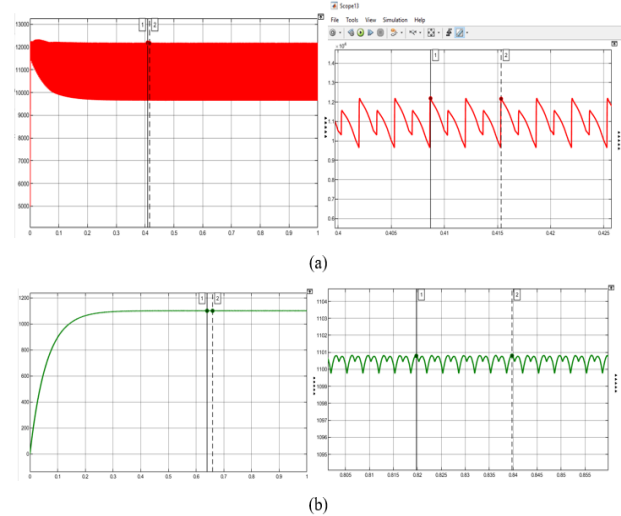
3.2.1. Subsistem 18-Pulse Diode Rectifier (Uncontrolled)

Meninjau Tabel 7 diatas dan berdasarkan Persamaan (24) dan (25) diperoleh nilai tegangan dan arus *output* DC pada subsistem converter 18-pulsa tak terkontrol yang ditampilkan pada Tabel 8 berdasarkan variasi jenis hubung yang dirancang. Hasil perhitungan parameter penunjang analisis juga ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Hasil analisis dan simulasi konverter 18-pulsa

Variasi	Vo-max (kV)	Vo-rms (kV)	Io-max (kA)	Iout-rms (kA)
D1/Y; D1/D11; D1/Yng	12,2	10,93	1,101	1,100
Y/D1; D1/D11; Y/D11	12,2	10,96	1,101	1,100

Output subsistem konverter 18 pulsa tak terkontrol ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Bentuk gelombang tegangan dan arus *output* 18-pulse diode rectifier

Tabel 9. Hasil perhitungan parameter penunjang

Parameter penunjang konverter 18 pulsa uncontrolled			
Parameter	Bridge-1	Bridge-2	Bridge-3
V_{RRM}	3,992kV	4,127kV	4,177kV
I_{FRM}	397,52A	397,52A	397,52A
I_{Fav}	126,64A	126,64A	126,64A
I_{FRms}	220,19A	220,19A	220,19A
I_{FRms}/I_{Fav}	1,74	1,74	1,74
Form Factor	1,0009	1,0009	1,0009
Ripple Factor	0,042	0,042	0,042
Output Ripple Frequency (fr)	300Hz	300Hz	300Hz

3.2.2. Subsistem 18-Pulse Thyristor Bridge Rectifier (Controlled)

Kalkulasi dan simulasi juga dilakukan pada konverter terkontrol berdasarkan Tabel 7, Persamaan (25), (26), dan (27) dengan hasil perhitungan dan analisis yang ditampilkan pada Tabel 10 dan Tabel 11.

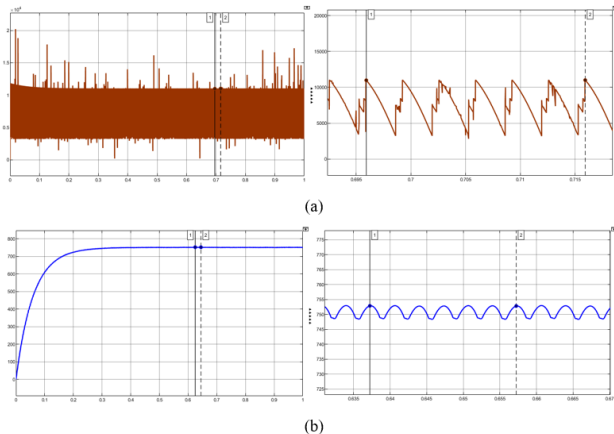
Tabel 10. Hasil analisis konverter terkontrol melalui jenis hubung trafo D1/Y;D1/D11; D1/Yng

Firing Angle	Vo-max (kV)	Vo-rms (kV)	Io-max (A)	Io-rms (A)
5°	14,50	7,752	752,3	750
10°	11,70	7,683	682,6	679,8
15°	10,34	6,870	608,6	605,7
20°	9,897	6,374	530,7	527,4
30°	8,845	4,886	362,7	359,3

Tabel 11. Hasil analisis konverter terkontrol melalui jenis hubung trafo Y/D1; D1/D11; Y/D11

Firing Angle	Vo-max (kV)	Vo-rms (kV)	Io-max (A)	Io-rms (A)
5°	10,95	7,977	818	816,2
10°	10,60	8,007	768,5	766,7
15°	10,18	7,688	716	714,3
20°	9,705	7,310	660,8	658,9
30°	8,780	6,338	543,9	541,5

Salah satu output subsistem konverter 18 pulsa terkontrol ditampilkan pada Gambar 11 dengan firing angle (α) = 5°.



Gambar 11. Bentuk gelombang tegangan dan arus output 18-pulse thyristor bridge rectifier saat α = 5°

3.3. Subsistem Inverter

Analisis inverter dilakukan berdasarkan Tabel 4 diatas dan Persamaan (28) hingga (34). Diketahui bahwa tegangan DC yang dipilih sebagai input rangkaian inverter adalah 10.930 volt (Uncontrolled), 7.752 volt, dan 7.977 volt (Controlled). Hasil kalkulasi Rs dan Cs berdasarkan tiap tegangan ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil perhitungan parameter snubber

Tegangan DC	Rs (Ω)	Cs (μF)
10.930	7,03	453,3
7.797	6,91	460,8
7.752	7,31	435,7

Hasil kalkulasi R, L, dan C untuk filter output inverter ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil perhitungan parameter filter inverter

Tegangan DC	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
10.930	46,154	1,341	1,153
7.797	46,154	1,318	1,173
7.752	46,154	1,392	1,110

Hasil kalkulasi R dan C untuk rangkaian DC-link ditampilkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Hasil perhitungan parameter DC-link

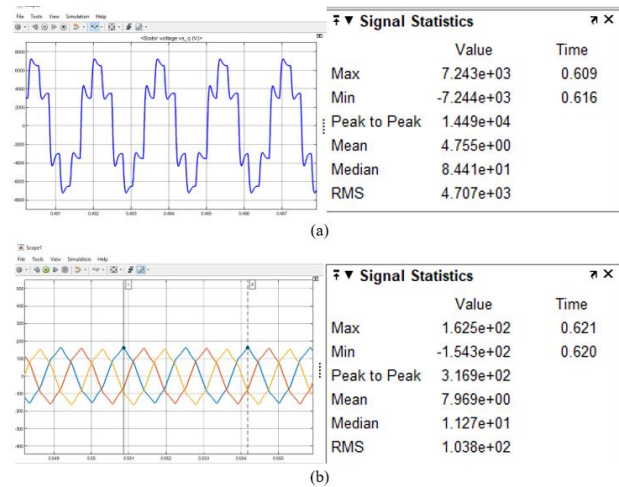
Tegangan DC	R (Ω)	C (μF)
10.930	9,936	17,72
7.797	9,773	30,80
7.752	10,336	42,36

Salah satu contoh hasil output inverter pada parameter pemilihan tegangan DC sebagai input inverter adalah 10.930 volt, dengan pengaturan modulasi frekuensi (Gain) = 15. Pengaturan frekuensi modulasi (Mf) = 15 untuk tegangan dan arus output inverter dan stator dapat dilihat pada Tabel 15

Tabel 15. Pengaturan frekuensi modulasi (Mf) = 15 untuk tegangan dan arus output inverter dan stator

Frekuensi (Hz)	Vout (kV)	Iout (A)	Vstator (kV)	Istator (A)
27,5	8,087	146,1	4,677	145,2
30	8,116	139,3	4,681	137,4
35	8,128	121,0	4,693	117,4
40	8,154	104,4	4,707	103,8
45	8,174	92,73	4,719	92,77
50	8,196	82,67	4,731	83,20

Salah satu bentuk gelombang tegangan dan arus stator dapat dilihat pada Gambar 12 saat rentang frekuensi 40 Hz.



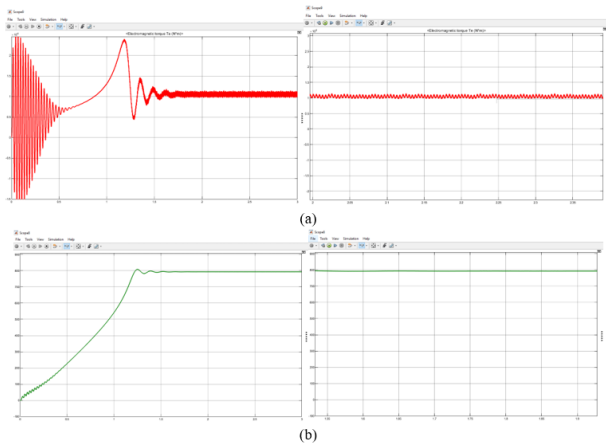
Gambar 12. Bentuk gelombang tegangan (a) dan arus (b) stator

Untuk memperoleh nilai kecepatan dan torsi yang sesuai dilakukan pengaturan modulasi amplitude (Gain) = 1 pada tegangan 10.930 volt. Pengaturan frekuensi modulasi (Mf) = 15 untuk tegangan, arus output inverter dan kecepatan serta torsi dapat dilihat pada Tabel 16

Tabel 16 Pengaturan frekuensi modulasi (Mf) = 15 untuk tegangan, arus output inverter dan kecepatan serta torsi

Frek. (Hz)	Vout (kV)	Iout (A)	Ns (rpm)	T (Nm)
27,5	3,374	119,0	495,9	545,9
40	4,878	167,9	793,2	13.370

Contoh hasil pengukuran torsi dan kecepatan pada rentang 40 Hz ditampilkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Hasil pengukuran torsi dan kecepatan motor modifikasi pada pengaturan 40 Hz

3.4. Meminimalisir Ripple dan Harmonik Sumber

Persamaan (35) menunjukkan bahwa gelombang DC dapat diminimalisir dengan menghitung nilai kapasitor melalui nilai *input* dan *output* DC yang telah dianalisis. Hasil perhitungan kapasitor dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Hasil perhitungan kapasitor untuk mencegah ripple dan harmonik input

Firing Angle (°)	Kapasitor (F)
5	9,71~10,05
10	9,59~9,93
15	9,41~9,74
20	9,15~9,48
30	8,44~8,73
45	6,89~7,13
60	4,87~5,04
75	2,52~2,61

Dilakukan analisis THD *input* setelah pemasangan kapasitor ditampilkan pada Tabel 17 hingga Tabel 20.

Tabel 18. THD untuk jenis hubung D1/Y; D1/D11; D1/Yng dan 18-pulse uncontrolled

α	thd V1	thd V2	thd V3	thd i1	thd i2	thd i3	thd Io
-	0,10 %	0,10 %	0,10 %	4,53 %	4,82 %	4,53 %	22,33 %

Tabel 19. THD untuk jenis hubung Y/D1; D1/D11; Y/D11 dan 18-pulse uncontrolled

α	thd V1	thd V2	thd V3	thd i1	thd i2	thd i3	thd Io
-	0,09 %	0,09 %	0,09 %	4,53 %	4,82 %	4,53 %	22,32 %

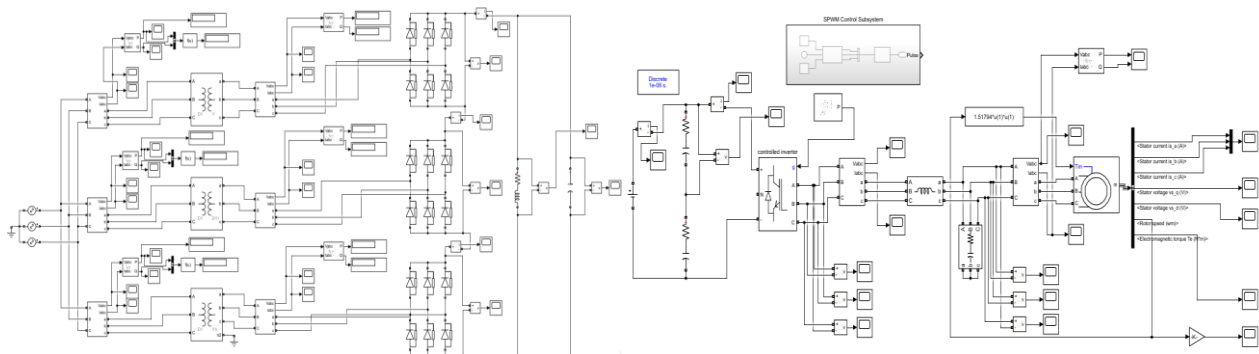
Tabel 20. THD untuk jenis hubung D1/Y; D1/D11; D1/Yng dan 18-pulse controlled

α	thd V1	thdV 2	thdV 3	thd i1	thd i2	thd i3	thd Io
5	0,01 %	0,01 %	0,01 %	5,10 %	6,30 %	5,09 %	8,98 %

Tabel 21. THD untuk jenis hubung Y/D1; D1/D11; Y/D11 dan 18-pulse controlled

α	thd V1	thd V2	thd V3	thd i1	thd i2	thd i3	thd Io
5	0,01 %	0,01 %	0,01 %	6,06 %	6,18 %	5,40 %	13,06 %

Salah satu hasil rancangan topologi sistem penyearah dan inverter dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Topologi sistem penyearah 18-pulsa tak terkontrol (18-pulse diode bridge rectifier) dan sistem VSI 3-level dengan metode pengontrolan SPWM

4. Kesimpulan

Perancangan topologi sistem penyearah dan inverter untuk pengatur kecepatan motor induksi rotor sangkar di *coal mill* Indarung 6 PT Semen Padang telah berhasil menentukan konfigurasi trafo ideal (D1/Y;D1/D11;

D1/Yng dan Y/D1; D1/D11; Y/D11) dan menghasilkan tegangan DC 7.752 volt, 7.977 volt, dan 10.930 volt dari konverter 18-pulsa (*controlled* maupun *uncontrolled*). Rangkaian VSI 3-level dengan metode pengontrolan SPWM pada pengaturan frekuensi memberikan tegangan dan arus stator yang optimal. Hasil pengujian

menunjukkan kinerja motor sesuai harapan. Pengembangan penelitian diharapkan pada implementasi sistem umpan balik tertutup (*close-loop feedback system*) agar pengontrolan pada sisi konverter penyearah maupun inverter menjadi lebih mudah dan otomatis, mempertimbangkan penerapan sistem PID dalam menunjang kestabilan sistem. Penerapan sistem kontrol PID dapat dilakukan pada subsistem inverter, khususnya pengontrolan frekuensi pada VSI 3 level untuk memperoleh nilai V/f pada metode SPWM yang digunakan melalui kalibrasi P, I, dan D dengan berbagai cara (S-Plane, Root Locus, Ziegler Nichols 1 & 2). Perancangan topologi subsistem inverter dapat menjadi rekomendasi dikarenakan penerapan prinsip VFD jenis *variable frequency* (V/f) dilakukan untuk mempertahankan torsi dan kecepatan motor bagi kebutuhan operasi *dampner* sesuai keadaan aktual saat ini. Penerapan tegangan 10.930 volt DC pada inverter yang dirancang mampu mempertahankan torsi dari 545,9 Nm hingga 13.370 Nm dan kecepatan dari 495,9 rpm hingga 793,2 rpm sesuai dengan operasi aktual dan mampu menekan konsumsi daya listrik dengan hasil pengukuran tegangan berkisar di 3.374 volt hingga 4.878 volt dan arus berkisar di 119,0 A hingga 167,9 A.

Referensi

- [1] M. Bruha, K. Pietiläinen, and A. Rauber, "High Speed Electrical Drives - Perspective of VFD Manufacturer," *E3S Web Conf.*, vol. 178, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017801006.
- [2] P. Albrechtowicz and J. Szczepanik, "The comparative analysis of phase shifting transformers," *Energies*, vol. 14, no. 14, 2021, doi: 10.3390/en14144347.
- [3] E. Sokol, V. Zamaruiev, V. Ivakhno, Y. Voitovych, O. Butova, and V. Makarov, "18-Pulse Rectifier With Electronic Phase Shifting and Pulse Width Modulation," *2018 IEEE 3rd Int. Conf. Intell. Energy Power Syst. IEPS 2018 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 290–294, 2018, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559530.
- [4] G. Y. Babu, Im Tech, K. Siva Kumar, and M. Tech, "Modeling of A 18 Pulse Converter For Improving Quality In Line Current Using 3-Phase Inverter," 2015.
- [5] H. Dewi, F. H. Jufri, and C. Hudaya, "Techno-economic analysis of slip ring motor replaced by standard squirrel cage induction motor with VSD," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/3/033107.
- [6] R. Wirasta Barus, "Analisa Efisiensi Daya Motor Induksi 3 Phase Squirrel Cage 250 Kw Dengan Inverter Sebagai Pengatur Speed Di Pt Socimas," 2022, [Online]. Available: <http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/19921>
- [7] A. Gudiño-Ochoa, J. Jalomo-Cuevas, J. E. Molinar-Solís, and R. Ochoa-Ornelas, "Analysis of Interharmonics Generation in Induction Motors Driven by Variable Frequency Drives and AC Choppers," *Energies*, vol. 16, no. 14, 2023, doi: 10.3390/en16145538.
- [8] I. M. W. Kastawan, E. Yusuf, and A. Fadhilah, "Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation," *Curr. J. Int. J. Appl. Technol. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 148–162, 2020, doi: 10.35313/ijatr.v1i2.30.
- [9] S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, B. M. Khan, and H. Zaman, "Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unit topologies with intrinsic harmonic current cancellation," *Energies*, vol. 11, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061347.
- [10] N. I. Nahin, M. Nafis, S. Prokash Biswas, M. Kamal Hosain, P. Das, and S. Haq, "Investigating the input power quality of multi-pulse AC-DC power converter fed induction motor drives," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11733.
- [11] B. Singh and P. Kant, "Multi-winding transformer for 18-pulse AC-DC converter fed 7-level CHB-inverter with fundamental switching based VCIMD," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2965802.
- [12] Y. Panda, "ANALYSIS OF CASCADED MULTILEVEL INVERTER INDUCTION MOTOR DRIVES."
- [13] T. A. Ahmed, E. E. M. Mohamed, A. R. Youssef, A. A. Ibrahim, M. S. R. Saeed, and A. I. M. Ali, "Three phase modular multilevel inverter-based multi-terminal asymmetrical DC inputs for renewable energy applications," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 831–839, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2019.11.003.
- [14] N. Saha, "Study of Variable Frequency Drive using Pulse Width Modulation," vol. 3, no. 4, pp. 39–41, 2018.
- [15] J. Nan and Z. Wang, "Discussion of the Importance of IGBT in Variable-Frequency Drive," vol. 87, no. Icmeit, pp. 782–787, 2019, doi: 10.2991/icmeit-19.2019.125.
- [16] D. Ravichandran and N. Muruganatham, "Effect Of Filter Current Reduction On Hybrid Shunt Active Filters In Three-phase Four Wire Network With Unbalanced Linear And Non-Linear Loads," *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 79–90, 2022, doi: 10.6180/jase.202301_26(1).0009.
- [17] U. Uknowledge and P. Aramane, "Stability Analysis and Design of a Tracking Filter for Variable Stability Analysis and Design of a Tracking Filter for Variable Frequency Applications Frequency Applications," 2018, doi: 10.13023/ETD.2018.140.