

SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN INVERTER TOPOLOGI DIODA CLAMPED 5 LEVEL BERBASIS PID

Wahyu Nurohmansah¹, Ibrahim Nawawi², Dwi Novianto³

Jurusan Teknik Elektro FT Untidar
wnurohmansyah@gmail.com

ABSTRAK

Inverter merupakan suatu rangkaian teknologi elektronika yang berfungsi mengubah arus listrik searah menjadi arus listrik bolak-balik dengan frekuensi tertentu. Gelombang tegangan keluaran inverter berupa gelombang sinus. Namun faktanya tegangan keluaran yang dihasilkan inverter tidaklah sinus murni melainkan menimbulkan harmonisa yang bisa mengakibatkan kerusakan pada komponen listrik. Adapun upaya untuk mengurangi harmonisa atau THD adalah dengan menggunakan Multilevel Inverter (MLI). Keluaran Multilevel Inverter berupa tegangan AC yang akan digunakan sebagai sumber motor induksi. Sulitnya pengontrolan kecepatan motor induksi merupakan salah satu problematika yang muncul dalam pengontrolan kecepatan. Sementara dalam automasi industri menuntut optimalisasi sistem kendali dan juga memiliki efisiensi tinggi. Pada penelitian ini digunakan Diode Clamped Multilevel Inverter (DCMLI) 5 level dengan teknik pemicuan APOD-PMW untuk meredam harmonisa, dan PID Ziegler-Nichols yang digunakan untuk pengontrolan kecepatan motor induksi. Penentuan parameter PID yang tepat bisa meminimalkan nilai overshoot dan nilai kecepatan menjadi lebih stabil pada titik referensi. Pada pengendalian kecepatan referensi 1000 Rpm, 1200 Rpm dan 1400 Rpm dengan variasi beban 0 Nm, 30 Nm dan 60 Nm menunjukkan bahwa respon awal mengalami overshoot mencapai 7,61%. Hasilnya setelah melakukan perhitungan parameter PID, respon kecepatan menjadi lebih stabil dan tidak mengalami overshoot. Steady state error terkecil 0.1% dan steady state error terbesar hanya mencapai 0.82% ketika nilai $K_p = 0.3870$, $K_i = 0.124$ dan $K_d = 0.031$ serta THD 14,65%.
Kata kunci : Inverter, Dioda Clamped, THD, Motor Induksi, PID

ABSTRACT

*Abstract Inverter is a series of electronic technology that functions to convert direct electric current into alternating electric current with a certain frequency. The inverter output voltage waveform is a sine wave. But the fact is that the output voltage produced by the inverter is not pure sine but creates harmonics that can cause damage to electrical components. The effort to reduce harmonics or THD is to use a Multilevel Inverter (MLI). The output of the Multilevel Inverter is an AC voltage that will be used as a source of an induction motor. The difficulty of controlling the speed of an induction motor is one of the problems that arise in speed control. Meanwhile, industrial automation demands optimization of control systems and high efficiency. In this study, was used Clamped Multilevel Inverter 5-level (DCMLI) Diode with triggering technique APOD-PMW to dampen harmonics, and a PID Ziegler-Nichols which was used to control the speed of an induction motor. Determining the right PID parameter can minimize the overshoot value and the speed value becomes more stable at the reference point. In controlling the reference speed of 1000 Rpm, 1200 Rpm and 1400 Rpm with a load variation of 0 Nm, 30 Nm and 60 Nm, it shows that the initial response overshoot reaches 7.61%. The result is that after calculating the PID parameters, the speed response becomes more stable and does not experience overshoot. The smallest steady state error is 0.1% and steady state error largest only reaches 0.82% when the value of $K_p = 0.3870$, $K_i = 0.124$ and $K_d = 0.031$ and THD 24.65%.
Keyword: Inverter, Diode Clamped, THD, induction motor, PID*

PENDAHULUAN

Inverter merupakan suatu rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik dengan frekuensi tertentu. Tegangan arus searah atau DC (Direct Current) dapat berasal dari baterai, panel surya, atau sumber-sumber DC lainnya. Keluaran dari inverter digunakan untuk menyuplai beban-beban yang membutuhkan tegangan AC (Alternating Current) seperti pada motor induksi [1].

Gelombang tegangan keluaran inverter berupa sinyal sinusoidal. Namun faktanya tidaklah demikian, tegangan keluaran yang dihasilkan inverter bukan sinus murni, sehingga menimbulkan harmonisa pada keluaran inverter. Pada inverter konvensional gelombang kotak dan SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) gelombang keluaran yang dihasilkan mempunyai THD yang cukup besar. Total Harmonic Distortion (THD) atau dapat diterjemahkan sebagai Distorsi Harmonik Total merupakan indeks penting yang digunakan secara luas untuk mengetahui kualitas daya listrik pada sistem transmisi dan distribusi. THD menyatakan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonisa. [2]

THD yang cukup besar tersebut akan menyebabkan kinerja komponen listrik tidak maksimal dan semakin lama akan menyebabkan kerusakan pada komponen tersebut. Oleh karena itu diperlukan tindakan-tindakan untuk meredam THD pada keluaran inverter. Salah satu metode untuk mengurangi THD pada inverter adalah dengan menggunakan Multi-Level Inverter (MLI).

Pada kesempatan penelitian kali ini, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian baru, mengingat subjek, tempat, dan metode penelitian yang berbeda dengan para peneliti sebelumnya pada tema yang serupa, untuk merancang dan menganalisis Dioda Clamped Multi-Level Inverter (DCMLI) 5 level dengan pengendalian PID dan teknik pemecutan Alternatif Phase Opposition Disposition (APOD). DCMLI digunakan sebagai penggerak motor induksi tiga fasa sedangkan pengendalian PID digunakan sebagai pengatur kecepatan pada motor. Teknik pemecutan APOD merupakan salah satu teknik SPWM. Diharapkan dengan

menggunakan metode tersebut dapat mengontrol kecepatan motor induksi tiga fasa sesuai yang dikehendaki, serta mampu meredam THD.

LANDASAN TEORI

1. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi merupakan suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak atau energi mekanik, dimana energi gerak ini berupa perputaran pada poros motor. Motor AC (Alternatif Current) mempunyai dua macam tipe yakni asynchronous motor dan synchronous motor. Motor induksi termasuk tipe asynchronous motor atau motor tak serempak, karena perputaran poros motor tidak sama dengan putaran medan fluks magnet stator. Dengan kata lain terdapat selisih putaran antara putaran rotor dan putaran fluks magnet yang di sebut dengan slip.

Motor induksi memiliki konstruksi yang sangat sederhana, yaitu terdiri dari stator merupakan bagian yang diam dan rotor sebagai bagian yang berputar. Motor induksi merupakan motor yang paling umum digunakan dalam berbagai peralatan industri. Popularitasnya banyak digunakan karena memang rancangannya yang sederhana, murah dan mudah didapat. Motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator, di mana arus rotor pada motor ini merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar (Rotating magnetic field) yang dihasilkan oleh arus stator. [3]

2. Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi tiga fasa yaitu ketika stator diberi arus maka stator akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet tersebut bergerak dengan kecepatan sinkron di sekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Dengan adanya medan magnet kedua yang akan menimbulkan slip pada motor induksi.

$$S = N_s - N_r \dots \dots \dots (2.1)$$

$$N_s = 120f / P \dots \dots \dots (2.2)$$

$$N_r = (1 - S) N_s \dots \dots \dots (2.3)$$

$$f(r) = ((N_s - N_r) / P) / 120 \dots \dots \dots (2.4)$$

$$f(s) = N_s P / 120 \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan :

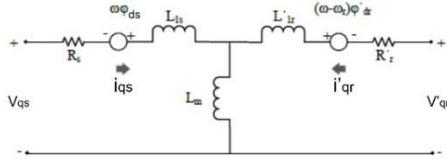
S = Kecepatan Slip

Ns = Kecepatan Motor

N_r = Kecepatan Rotor
 $f(r)$ = Frekuensi Rotor
 $f(s)$ = Frekuensi Stator
 P = Jumlah Kutub magnet stator

3. Persamaan Motor Induksi

Semua parameter dan variable listrik dirujuk ke stator, seperti ditunjukkan oleh persamaan motor induksi. Semua jumlah stator dan rotor berada dalam referensi dua-sumbu yang acak (fram dq).



Gambar 1. q-axis.

Keterangan :

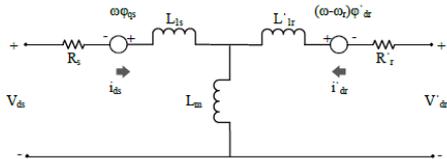
$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\phi_{qs}/dt + \omega\phi_{ds} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\phi_{ds}/dt - \omega\phi_{qs} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$V'_{qr} = R_r i'_{qr} + d\phi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'_{dr} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$V'_{dr} = R_r i'_{dr} + d\phi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$T_e = 1.5p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \dots \dots \dots (2.10)$$



Gambar 1. d-axis.

Keterangan :

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\phi'_{qr} = L_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\phi'_{dr} = L_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad L_r = L'_{lr} + L_m \dots \dots \dots (2.15)$$

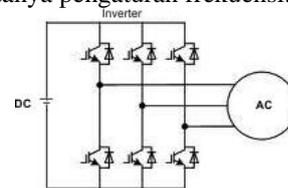
Tabel 2.1 Keterangan q-axis dan d-axis

Parameter	Keterangan
Ω	Referensi kecepatan sudut
ω_r	Kecepatan sudut listrik
R_s	Stator resistance
L_{ls}	Kebocoran induktansi
L_m	Induktansi magnetisasi
L_s	Induktansi stator total
V_{qs}	Tegangan sumbu q stator
I_{qs}	Arus sumbu q stator
V_{ds}	Tegangan sumbu d stator
I_{ds}	Arus sumbu d stator
Ω_m	Kecepatan sudut rotor
Θ_m	Posisi sudut rotor

P	Jumlah pasangan kutub
Ω_r	Kecepatan sudut listrik
Θ_r	Posisi sudut rotor listrik
T_e	Torsi elektromagnetik
T_m	Torsi mekanis poros
J	Kombinasi rotor dan koefisien inersia beban. Atur sampai tak hingga.
H	Gabungan rotor dan beban inersia konstan. Atur sampai tak hingga untuk mensimulasikan rotor terkunci.
F	Gabungan rotor dan beban koefisien gesekan viskos
L_r	Induktansi rotor total
R_r, L'_{lr}	Resistansi rotor dan kebocoran induktansi
V'_{qr}, I'_{qr}	Tegangan rotor sumbu q, dan arusnya
V'_{dr}, i'_{dr}	Tegangan rotor sumbu d, dan arusnya

4. Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan dalam mengubah sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC dengan adanya pengaturan frekuensi.

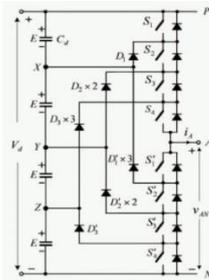


Gambar 3. Rangkaian dasar inverter

Bentuk gelombang inverter ideal adalah berbentuk gelombang sinusoida, sedangkan bentuk gelombang inverter dalam keperluan praktis tidak berbentuk sinusoida dan mengandung harmonisa, dimana hampir semua aplikasi inverter tegangan harmonik mempengaruhi performa sistem (Zuhal, 2000). Inverter DC-AC biasanya dioperasikan dengan teknik Pulse Width Modulation (PWM) yang merupakan suatu teknik untuk mengontrol besarnya lebar pulsa (duty cycle). Teknik PWM digunakan untuk menjaga keluaran tegangan pada inverter pada nilai yang dibutuhkan yang terlepas dari keluaran beban. Pada inverter konvensional, perubahan nilai keluaran tegangan tergantung pada perubahan nilai beban sehingga untuk meniadakan perubahan tersebut dengan

mengubah lebar pulsa yang memberikan nilai keluaran konstan.

5. Inverter Multilevel



Gambar 4. Rangkaian dasar inverter multilevel

Multilevel inverter adalah sistem konversi daya yang terdiri dari perangkat semikonduktor dan kapasitor apabila digunakan secara sistematis menghasilkan gelombang tegangan multilevel dengan frekuensi, fasa dan amplitude terkontrol (Buja & Kazmierkowski, 2004). Topologi dari multilevel inverter diklasifikasikan menjadi tiga tipe diantaranya adalah flying capacitor, cascaded h-bridge multilevel inverter, dan diode clamped. Topologi multilevel inverter diode clamped yaitu diode digunakan sebagai perangkat untuk menjepit tegangan bus DC sehingga mencapai level output tegangan. Dengan meningkatnya jumlah level tegangan, kualitas tegangan keluaran menjadi lebih dekat dengan gelombang sinusoidal.

6. Pulse Widht Modulation (OMW)

PWM (Pulse Width Modulation) adalah salah satu teknik modulasi dengan mengubah lebar pulsa (duty cylce) dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. Satu siklus pulsa merupakan kondisi tinggi kemudian berada di zona transisi ke kondisi rendah. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Duty Cycle merupakan representasi dari kondisi logika high dalam suatu periode sinyal dan di nyatakan dalam bentuk (%) dengan jarak 0% sampai 100%.

PWM banyak digunakan sebagai teknik pemicuan inverter dengan sinyal pembawa. Secara umum ada tiga macam teknik pemicuan gelombang modulasi, yaitu :

- a. In-phase disposition (IPD), di mana semua gelombang pembawa berada dalam fasa yang sama.

- b. Phase opposition disposition (POD), di mana semua gelombang sinyal pembawa diatas referensi nol berada dalam fasa yang sama dan dibawah nol berbeda 180o dari fasa awal.

- c. Alternate phase opposition disposition (APOD), di mana setiap gelombang pembawa berbeda fasa 180o dengan pembawa lainnya.

7. Alternatif Phase Opposition Disposition

Teknik ini memerlukan masing-masing bentuk gelombang pembawa $m-1$, untuk bentuk gelombang fase tingkat m , menjadi fase yang dilepaskan satu sama lain dengan 180 derajat.

Aturan untuk metode APOD, bila jumlah level $m = 5$, yaitu :

- a. Bentuk gelombang pembawa $m-1=4$ disusun sedemikian rupa sehingga masing-masing bentuk gelombang pembawa berada diluar fase dengan pembawanya 180o.

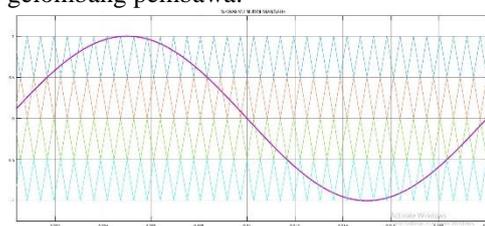
- b. Kemudian beralih ke $+ V_{dc} / 2$ bila referensi lebih besar dari semua bentuk gelombang pembawa.

- c. Kemudian beralih ke $+ V_{dc} / 4$ bila referensi kurang dari bentuk gelombang pembawa paling atas dan lebih besar dari semua operator lainnya.

- d. Kemudian beralih ke 0 bila referensi kurang dari dua bentuk gelombang pembawa paling atas dan lebih besar dari dua operator paling rendah.

- e. Kemudian beralih ke $- V_{dc} / 4$ bila referensi lebih besar dari bentuk gelombang pembawa paling bawah dan lebih rendah dari semua operator lainnya.

- f. Kemudian beralih ke $V_{dc} / 2$ bila refensi lebih rendah dari semua bentuk gelombang pembawa.



Gambar 5. APOD

Setiap bentuk gelombang pembawa berada dalam fasa dan 180 derajat dengan gelombang pembawa lainnya yang berada didekatnya. Sinyal fundamental memiliki nilai 60 Hz. Sedangkan sinyal pembawa berdasarkan dengan rumus :

$$mf = fs / f1 \dots \dots \dots (2,16)$$

$$51 = fs /$$

$$fs = 2550 \text{ Hz}$$

Nilai mf merupakan bilangan bulat kelipatan 3 untuk inverter tiga fasa. Adapun modulasi skema membutuhkan sinyal fundamental 50 Hz dengan sinyal segitiga sebanyak (m-1). Semua sinyal segitiga berada pada sudut yang berbeda 180 derajat satu sama lain. Untuk menentukan jumlah sinyal pembawa segitiga pada multilevel inverter menggunakan rumus:

$$S = m - 1 \dots \dots \dots (2,17)$$

Dengan :
S = Jumlah sinyal segitiga
m = jumlah level multilevel

Dengan menggunakan persamaan 2.17 diperoleh jumlah sinyal pembawa segitiga :

$$S = 5 - 1$$

S = 4 Sinyal segitiga. Pada gambar 4 ditunjukkan jumlah komponen Repeating Sequence berjumlah 4 (T1, T2, T3 dan T4).

Untuk menentukan Amplitudo setiap sinyal segitiganya sebagai berikut :

$$A_m = 2 / (m-1) \dots \dots \dots (2,18)$$

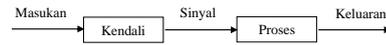
$$A_m = 2 / (5-1)$$

$$A_m = 0.5$$

8. Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan suatu cara yang dipelajari dari kebiasaan manusia dalam pengamatan kualitas produk yang dihasilkan sehingga memiliki hasil dengan karakteristik sesuai dengan yang diharapkan. Seiring dengan berkembangnya teknologi, cara manusia dalam melakukan kegiatan teknik kendali juga ikut mengalami banyak perubahan. Pada awalnya pekerjaan kendali hanya dilakukan oleh manusia (manual system), tetapi kemudian perlahan mulai digantikan oleh mesin yang bekerja secara otomatis (automatic system). Pada dasarnya sistem kendali memiliki tujuan untuk menghasilkan nilai keluaran (output) sesuai yang diharapkan berdasarkan nilai masukan (input) yang diberikan kepada sistem. Sistem kendali sendiri dibedakan menjadi dua jenis yaitu sistem kendali terbuka dan sistem kendali tertutup.

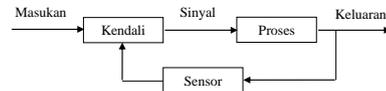
Sistem kendali terbuka merupakan sebuah sistem kendali yang nilai keluarannya tidak dibandingkan atau tidak diumpan balikkan dengan nilai masukan



Gambar 6. Blok sederhana sistem kendali terbuka.

Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa keluaran (output) yang dihasilkan oleh sistem tersebut tidak diumpan balikkan ke pengendali masukan. Input yang dimasukkan dalam pengendali akan diproses dengan hasil output yang memiliki nilai konstan sesuai dengan input tanpa ada koreksi nilai dari sistem kendali.

Sedangkan sistem kendali tertutup dengan nilai keluarannya di umpan balikkan untuk di dibandingkan dengan nilai masukan sistem.



Gambar 7. Blok Sederhana sistem kendali tertutup.

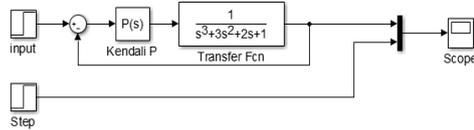
Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa keluaran hasil proses suatu sistem tersebut diumpan balikkan pada pengendali melalui sensor (measuring element) untuk memperoleh error value dari perbandingan output dengan set point. Umpan balik ini akan mengkoreksi nilai output dengan nilai error yang terjadi sehingga nilai output dapat diatur sesuai yang diharapkan. Kendali tertutup merupakan bentuk kendali yang digunakan untuk automasi suatu proses dalam sistem karena terdapat feedback yang dapat mengkoreksi keluaran output sistem secara terus-menerus sampai diperoleh keluaran sama seperti yang telah diatur.

Sistem kendali yang diterapkan dalam otomatisasi industri memiliki banyak variasi seperti kendali proporsional, kendali integral, kendali derivative, kendali PI (kombinasi kendali proporsional dan kendali integral) dan kendali PID (kombinasi dari kendali proporsional, integral dan derivative). Kontrol atau pengendalian yang digunakan pada penelitian ini adalah PID (Proportional Integral Derivatif).

a. Kendali proporsional (P)

Kendali proporsional (P) dikenal juga dengan istilah kendali gain atau penguatan yang memiliki pengaruh pada sistem yang dapat memperbaiki response sistem khususnya rise time dan juga settling time.

Selain itu, fungsi dari kendali proportional juga untuk meminimalisir steady state error pada sistem, namun disisi lain penggunaan kendali proportional juga bisa memperbesar response sistem yang berbanding lurus dengan besarnya error itu sendiri, sehingga nilai parameter proportional harus dalam batasan yang tepat.

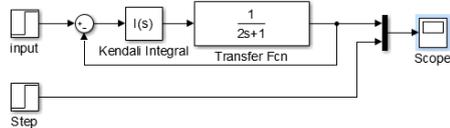


Gambar 8. Contoh *Plant* sistem kendali P

Sistem plant pada gambar 2.8 merupakan sistem yang dapat dikatakan sistem yang tidak stabil, dengan memberikan kendali proportional (P) bentuk kurva sinyal response sistem akan berubah. Perubahan yang terjadi tergantung pada besarnya nilai proportional yang diberikan, nilai yang tidak sesuai akan menyebabkan response sistem menjadi berosilasi dan tidak bisa mencapai keadaan stabil. Kendali proportional yang sesuai dapat mengurangi waktu sistem untuk menjadi stabil (settling time), namun dengan pemberian nilai proportional yang terlalu besar atau melebihi batas akan menyebabkan sistem gagal dalam mencapai stabilitas sistem.

b. Kendali Integral (I)

Kendali integral (I) merupakan kendali yang memiliki pengaruh dalam sistem yang dapat meminimalisir bahkan dapat menghilangkan steady state error, namun disisi lain dapat juga membuat response lebih lambat dan menimbulkan ketidakstabilan. Kendali integral bekerja sebanding dengan besarnya error, semakin besar error semakin cepat sinyal kendali bertambah atau berubah.



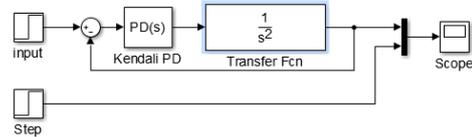
Gambar 9. Contoh *plant* sistem kendali I

Pada gambar 9 merupakan sistem plant yang menggunakan kendali integral, terjadi perubahan response sistem. Perbandingannya terlihat jelas saat plant sistem sebelum dan setelah dipasang kendali integral. Sebelum plant sistem dipasang kendali integral, response tidak dapat mencapai set point yang di inginkan, sedangkan setelah

dipasang kendali integral, response sistem mampu mencapai set point yang di inginkan. Efek dari perubahan ini diikuti dengan munculnya steady state error dan juga osilasi yang diakibatkan oleh efek kendali integral.

c. Kendali Derivative (D)

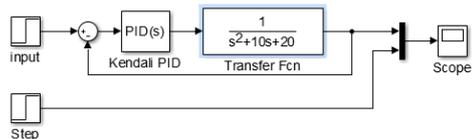
Kendali derivative (D) merupakan kendali yang memiliki pengaruh pada response sistem yang dapat memberikan efek redaman pada sistem yang berosilasi sehingga dapat mempengaruhi nilai kendali proportional serta dapat memperbaiki kualitas response transient. Penggunaan kendali derivative tidak dapat berdiri sendiri dikarenakan kendali derivative ini hanya berpengaruh jika ada perubahan error, sehingga kendali derivative harus dikombinasikan dengan kendali kendali proportional maupun kendali integral.



Gambar 10. Contoh *Plant* sistem kendali PD

d. Kendali PID

Kendali PID merupakan teknik kendali yang banyak digunakan dalam proses automasi. Ada beberapa pertimbangan mengapa kendali PID lebih banyak di aplikasikan, diantaranya adalah karena PID memiliki perpaduan dari tiga kendali yang dapat memberikan efek redaman osilasi, percepatan settling time, dan meminimalisir steady state error secara bersamaan pada sistem. Kendali PID sering dijumpai bukan hanya dalam bentuk modul kendali sederhana seperti temperature controller, pressure controller dan lain sebagainya, tetapi juga sudah berkembang dalam bentuk modul yang lebih kompleks yang dapat berfungsi untuk mengendalikan banyak variable sekaligus (Distribute Control System), bahkan dalam bentuk modul independen seperti sistem PLC (Programmable Logic Control).



Gambar 11. Contoh *plant* sistem kendali PID

Pengendalian PID merupakan pengendalian yang digunakan dalam menentukan nilai presisi suatu sistem instrumentasi dengan adanya karakteristik berupa umpan balik pada sistem. Pengendalian PID disini berfungsi sebagai penerima masukan dari sinyal error yang bersal dari selisih kecepatan referensi dan kecepatan aktual pada motor. Ada 3 parameter utama didalam pengendalian PID yang digunakan sebagai pengendalian suatu sistem, serta pada masing-masing parameter tersebut memilki fungsi tersendiri. Parameter tersebut yaitu Kp, Ki, dan Kd. Parameter Kp berfungsi untuk menambah overshoot, mengecilkan steady steady state error, memperbaiki rise time dan settling time. Parameter Ki berfungsi untuk mengurangi kesalahan pada keadaan stabil dan menghapuskan steady steady state error. Parameter Kd berfungsi untuk mempercepat sistem pada keadaan stabil, memperkenalkan sinyal koreksi sebelum penyimpangan nilai sinyal menjadi lebih besar dan dapat mempercepat respon sistem untuk mengurangi pengaturan waktu transien. Persamaan matematis kendali PID dapat ditulis sebagai berikut:

$$U(t)=K_p(E(t))+K_i \int E(t) dt+K_d \frac{d}{dt} E(t)..(2,19)$$

Ditransformasikan laplace menjadi :

$$U(s)=K_p(E(s)+1/T_i S)+T_d S E(s)).....(2,20)$$

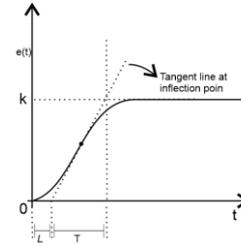
Keterangan :

- Kp = penguatan proporsional;
- Ti = waktu integral;
- Td = waktu derivative;
- U(s) = Sinyal kendali;
- E(s) = Sinyal error.

Faktor yang lebih penting dalam merancang kendali PID adalah penentuan parameter PID itu sendiri agar sistem kendali tertutup memenuhi kriteria yang diinginkan, penentuan parameter ini disebut juga dengan istilah penalaan atau tuning. Adapun salah satu metode tuning parameter PID adalah dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols, yang mana memiliki dua cara yaitu dengan kurva reaksi dan osilasi. Kelebihan dari kedua metode ini adalah dapat diaplikasikan dengan menghasilkan response sistem dengan overshoot maksimum sebesar 25%.

1. Metode Kurva Reaksi

Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem kendali terbuka yang response sistemnya dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Kurva reaksi

Bentuk kurva pada gambar 12 mempunyai dua konstanta, waktu matu atau dead time (L) dan waktu tunda atau time delay (T). Dead time (L) merupakan batas antara titik (0,0) sampai sesaat titik naiknya kurva, sedangkan time delay (T) menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan mantapnya. Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis itu akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum steady state. Untuk menentukan nilai T dan L, perlu mengetahui titik rise time (L) dan settling time (ST). L merupakan waktu gelombang berhenti sebelum mencapai naiknya menuju overshoot sedangkan ST merupakan lamanya waktu yang dibutuhkan gelombang dari L sampai gelombang mencapai titik stabil atau steady state.

$$T = ST - L.....(2,21)$$

Keterangan :

- L = Dead time
- ST = Settling time
- T = Time delay

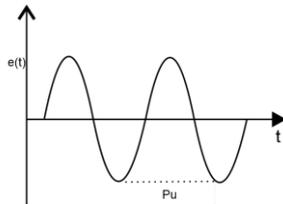
Tabel 2. Rumus tuning PID Ziegler-Nichols metode kurva reaksi

Tipe Kendali	Kp	Ki	Kd
P	T/L	~	0
PI	0.9 T/L	L/0.3	0
PID	1.2 T/L	2L	0.5L

2. Metode Osilasi

Pada metode Ziegler-Nichols yang ke dua, penalaan dilakukan dalam loop tertutup dimana masukan referensi yang digunakan adalah fungsi tangga (step). Semula parameter-parameter integrator disetel tak terhingga dan parameter diferensial disetel sama dengan nol ($T_i = \infty$; $T_d = 0$). Pengendali proporsional, Kp, dinaikkan dari 0 sampai nilai kritis Kp, sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama. Nilai kritis Kp ini disebut juga sebagi ultimate gain. Sistem

dapat beresilasi dengan stabil pada saat $K_p = K_u$.



Gambar 13. Kurva osilasi sistem kendali terbuka

Penalaan parameter PID didasarkan terhadap kedua konstanta hasil eksperimen, K_u dan P_u . Ziegler dan Nichols menyarankan agar penyetelan nilai parameter K_p , T_i dan T_d berdasarkan rumus yang diperlihatkan pada tabel 3.

Tabel 3 Rumus tuning PID Ziegler-Nichols metode osilasi

Tipe Kendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$		
PI	$0.45 K_u$	$1.2 P_u$	
PID	$0.6 K_u$	$0.5 P_u$	$0.125 P_u$

Berdasarkan tabel 2.4 nilai K_p , K_d , dan K_i dapat ditentukan dan nilai dari P_u bisa ditentukan dengan persamaan :

$$P_u = 2\pi/\omega \dots \dots \dots (2.22)$$

Keterangan :

P_u = waktu puncak gelombang ke puncak gelombang.

ω = frekuensi osilasi

METODE PENELITIAN

1. ALAT DAN BAHAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa software Matlab Simulink R2016a (versi 9.0.0.341.360) sebagai simulator. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari motor induksi 3 fasa yaitu Asynchronous Machine SI Units, yang memiliki spesifikasi.

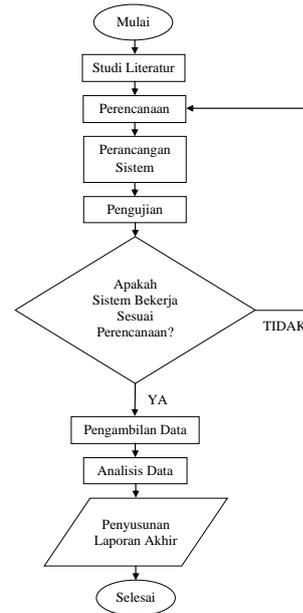
Tabel 1. Spesifikasi Asynchronous Machine SI Units

Daya	20 HP (15 KW)
Tegangan	400 Volt
Kecepatan	1460 RPM
Frekuensi	50 Hz
Jumlah fasa	3
Hambatan Stator	0.6837 Ohm
Hambatan Rotor	0.451 Ohm

Induktansi Stator	0.004125 Henry
Induktansi Rotor	0.004125 Henry
Inertia	0.05 Kg/m ²
Friction factor	0.009541 N.m.s
Pole	2
Induktansi bersama	0.06419 Henry

2. METODE PENELITIAN

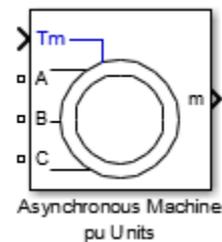
Adapun metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu :



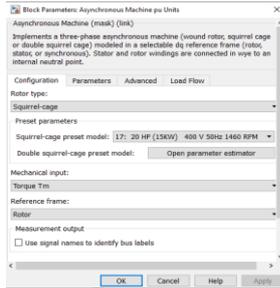
Gambar 1. Diagram Alr Metode Penelitian

3. PEMODELAN MOTOR INDUKSI

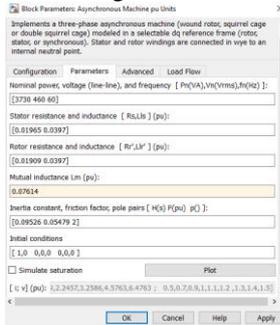
Jenis motor yang digunakan pada penelitian ini merupakan motor induksi 3 fasa motor rotor sangkar tupai atau squirrel cage, yang memiliki kapasitas daya motor induksi sebesar 20 HP (14.914 watt) dengan frekuensi 50 Hz. Model motor ini telah disediakan dalam Simulink library.



Gambar 2. Model motor induksi 3 fasa



Gambar 3. Configuration Motor Induksi



Gambar 4. Parameter motor induksi

4. PEMODELAN DCMLI 5 Level

Pada prinsipnya multilevel inverter memiliki fungsi yang sama dengan inverter konvensional yaitu untuk merubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik. Perbedaannya terletak pada jumlah saklar, yang mana multilevel inverter memiliki beberapa saklar, semakin tinggi tingkatan level yang dirancang semakin banyak pula saklar yang digunakan. Multilevel inverter juga memiliki beberapa sumber DC yang kemudian akan diubah menjadi tegangan AC. Pada prosesnya multilevel inverter melakukan pensaklaran terhadap komponen Switching yaitu IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Adapun IGBT yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai Snubber Resistance (R_s) = $1e-3$ ohm, Internal Capacitance (R_{on}) = $1e-5$ ohm, Snubber Capacitance (R_c) = Inf . Sumber DC yang digunakan memiliki tegangan sebesar 400 volt sesuai jenis motor sangkar tupai yang digunakan. Sehingga dari sumber tegangan DC akan menghasilkan pola keluaran yang sesuai dengan waktu nyala dan waktu mati ketika komponen IGBT tersebut di trigger terbentuklah pola gelombang sinusoidal.

5. PEMODELAN APOD-PMW

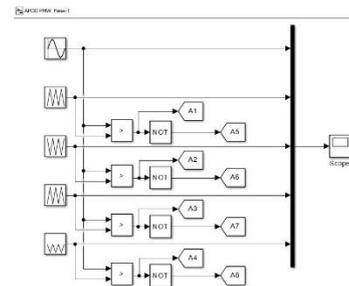
Teknik multicarrier telah banyak digunakan dan juga dikembangkan untuk mengurangi distorsi pada multilevel inverter.

Alternatif Phase Oposition Disposition – Pulse Modulation Widht (APOD-PMW) merupakan salah satunya. Proses implementasinya pada APOD dimana sinya pembawa dengan frekuensi tinggi akan dibandingkan dengan sinyal referensi sinusoidal untuk menghasilkan sinyal akan di switching kedalam rangkaian multilevel inverter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. HASIL PENGUJIAN APOD-PMW

Sebelum menguji inverter terlebih dahulu merancang dan menguji APOD PMW (*Alternatif Phase Oposition Disposition – Pulse Modulation Widht*) sebagai teknik multicarrier untuk mengurangi distorsi, yang mana sinyal pembawa dengan frekuensi tinggi akan dibandingkan dengan sinyal sinusoidal untuk menghasilkan sinyal yang akan di switching ke dalam multilevel inverter.



Gambar 1. Pemodelan APOD-PMW Fasa 1

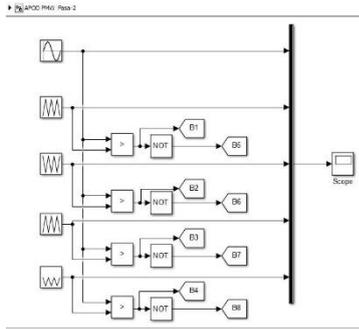
Gambar 1 adalah bentuk pemodelan APOD-PMW yang dirancang untuk memberikan sinyal referensi yang akan di switch menuju IGBT pada inverter bagian fasa A. Sumber sinyal menggunakan sine wave atau gelombang sinus dengan posisi sudut 0 rad, kemudian dengan pengaturan kecepatan sudut sebesar $2\pi f$.

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi(50\text{Hz})$$

$$\omega = 100\pi \text{ rad/s}$$

Parameter nilai output pada repeating sequence diatur untuk menghasilkan sinyal skalar secara periodik.



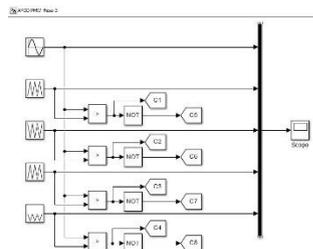
Gambar 2. Pemodelan APOD-PMW Fasa 2

Gambar 4.2 adalah bentuk pemodelan APOD-PMW yang dirancang untuk memberikan sinyal referensi yang akan di switch menuju IGBT pada inverter bagian fasa B. Sumber sinyal menggunakan sine wave atau gelombang sinus dengan posisi sudut $2/3\pi$ rad, kemudian dengan pengaturan kecepatan sudut sebesar $2\pi f$.

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi(50\text{Hz})$$

$$\omega = 100\pi \text{ rad/s}$$



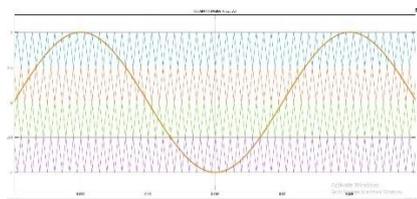
Gambar 3. Pemodelan APOD-PMW Fasa 3

Gambar 4.3 adalah bentuk pemodelan APOD-PMW yang dirancang untuk memberikan sinyal referensi yang akan di switch menuju IGBT pada inverter bagian fasa C. Sumber sinyal menggunakan sine wave atau gelombang sinus dengan posisi sudut $4/3\pi$ rad, kemudian dengan pengaturan kecepatan sudut sebesar $2\pi f$.

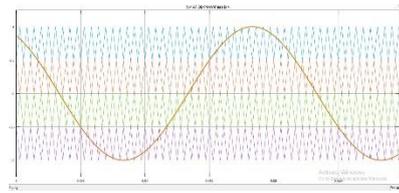
$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi(50\text{Hz})$$

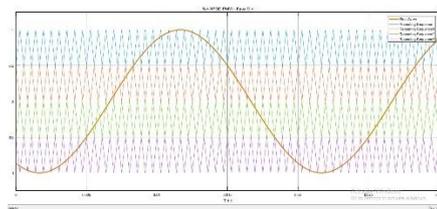
$$\omega = 100\pi \text{ rad/s}$$



Gambar 4 Respon APOD-PMW Fasa A

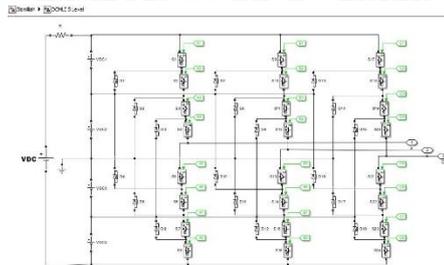


Gambar 5. Respon APOD-PMW Fasa B

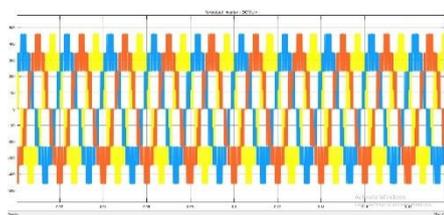


Gambar 6. Respon APOD-PMW Fasa C

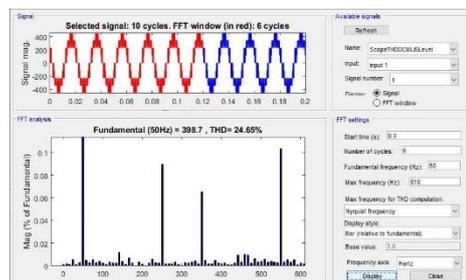
2. HASIL PENGUJIAN INVERTER



Gambar 7 Pemodelan DCMLI 5-Level

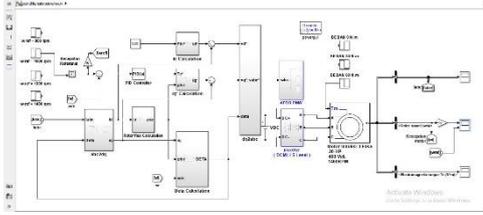


Gambar 8. Tegangan Output DCMLI 5Level



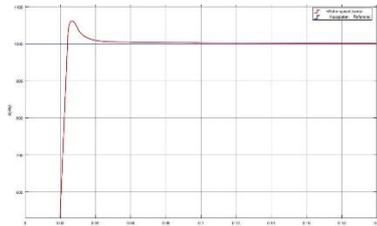
Gambar 9. THD DCMLI 5 Level

3. PENGENDALIAN PID



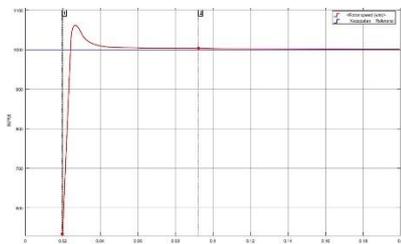
Gambar 10 Pemodelan pengendalian motor induksi 3 fasa

Pengendalian PID di tuning berdasarkan dengan hasil uji dari sistem dan rangkaian yang telah dibuat, dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols pengujian sistem harus menggunakan sinyal step sebagai sinyal referensi dan dibandingkan dengan nilai aktual hasil keluaran dari sistem. Uji coba pada kali ini dilakukan dengan mengambil sampel waktu antara 0 s sampai 1 s. Perubahan nilai kecepatan terjadi saat waktu 0.01s.



Gambar 11. Gelombang respon kecepatan 1000 RPM tanpa PID.

Bentuk Gelombang pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa respon yang didapatkan mengalami *overshoot* dengan nilai sebesar 7,61%. Respon sinyal masih belum mencapai nilai referensi yang diinginkan. Untuk menentukan nilai T dan L, perlu mengetahui nilai titik rise time (RS) dan settling time (ST). RS sendiri merupakan keadaan waktu gelombang berhenti sebelum mencapai overshoot sedangkan ST merupakan keadaan waktu gelombang saat mencapai titik stabil.



Gambar 12. Penentuan Titik T dan L respon kecepatan 1000 RPM

Berdasarkan gambar 4.12 didapatkan nilai RS adalah 0.02 dan ST adalah 0.092.

Sehingga :

$$T = RS - 0$$

$$T = 0.02 \text{ s}$$

$$L = ST - T$$

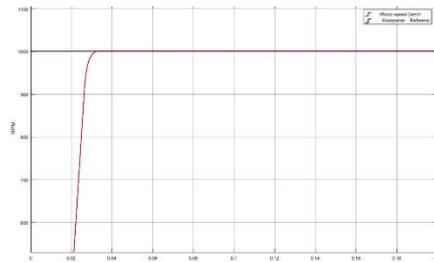
$$L = 0.092 - 0.02$$

$$L = 0.062$$

Berdasarkan pengamatan dan perhitungan pada gelombang penentuan titik T dan L respon kecepatan 1000 RPM didapatkan nilai T = 0.02s dan L = 0.062. Sehingga nilai-nilai tiap parameter PID nya adalah :

Type Kendali	K_p	K_i	K_d
P	T/L	~	0
PI	0.9 T/L	L/0.3	0
PID	1.2 T/L	2L	0.5L

Type Kendali	K_p	K_i	K_d
P	0.3225	~	0
PI	0.2903	0.2066	0
PID	0.3870	0.124	0.031



Gambar 13 Gelombang respon kecepatan 1000 RPM dengan PID

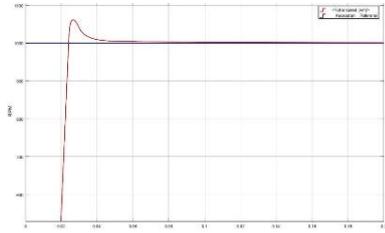
Dengan menggunakan nilai parameter $K_p = 0.3870$, $K_i = 0.124$ dan $K_d = 0.031$ pada pengendali PID, hasil respon bentuk gelombang motor induksi menjadi lebih stabil dan tidak mengalami *overshoot*.

4. PENGUJIAN RESPON KECEPATAN TANPA PID

Proses analisis respon respon kecepatan motor induksi 3 fasa yang masih tanpa menggunakan kontrol PID dilakukan ketika terjadi perubahan nilai kecepatan dari titik 0. Adapun uji coba pada penelitian ini mengambil tiga sampel nilai kecepatan referensi, yaitu pada nilai kecepatan 1000 rpm, 1200 rpm dan 1400 rpm. Hasilnya, masing-masing sinyal respon dari kecepatan referensi yang diberikan masih mengalami

overshoot yang cukup tinggi sebelum mencapai settling time atau respon stabil.

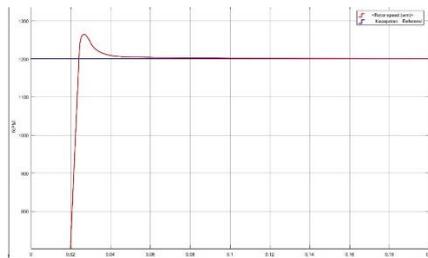
a. Kecepatan 1000 rpm



Gambar 14. Respon kecepatan 1000 rpm tanpa PID

Pada gambar 14. merupakan respon sinyal kecepatan motor induksi tanpa menggunakan kontrol PID masih mengalami overshoot. Puncak overshoot mencapai 1076.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1000 rpm. Sehingga, tanpa menggunakan kontrol PID respon kecepatan 1000 rpm masih mengalami overshoot sebesar 7.61%.

b. Kecepatan 1200 rpm



Gambar 15. Respon kecepatan 1200 rpm tanpa PID

Pada gambar 4.15 merupakan respon sinyal kecepatan motor induksi tanpa menggunakan kontrol PID masih mengalami overshoot. Puncak overshoot mencapai 1276.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1200 rpm. Sehingga, tanpa menggunakan kontrol PID respon kecepatan 1200 rpm masih mengalami overshoot sebesar 6.34%.

c. Kecepatan 1400 rpm



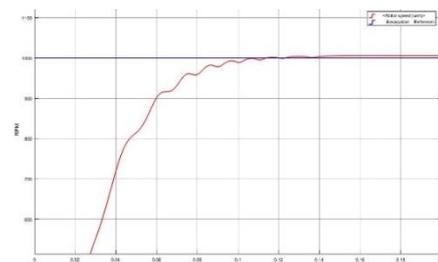
Gambar 16 Respon kecepatan 1400 rpm tanpa PID

Pada gambar 16. merupakan respon sinyal kecepatan motor induksi tanpa menggunakan kontrol PID masih mengalami overshoot. Puncak overshoot mencapai 1476.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1400 rpm. Sehingga, tanpa menggunakan kontrol PID respon kecepatan 1400 rpm masih mengalami overshoot sebesar 5.54%

5. PENGUJIAN RESPON KECEPATAN DENGAN PID

Proses analisis respon kecepatan motor induksi 3 fasa dilakukan yaitu ketika terjadi perubahan nilai kecepatan dari titik 0. Adapun uji coba pada penelitian ini mengambil tiga sampel nilai kecepatan referensi, yaitu pada nilai kecepatan 1000 rpm, 1200 rpm dan 1400 rpm. Pengujian tersebut dilakukan setelah didapatkan nilai parameter PID dengan menggunakan rumus perhitungan seperti pada tabel 4.1. Masing-masing respon kecepatan referensi dianalisis dengan menambahkan beban torsi 0 Nm, 30 Nm dan 60 Nm, untuk mengetahui apakah ada perubahan kecepatan atau tidak setelah diberikan beban. Hasilnya, ketika kecepatan referensi dirubah dan juga diberikan variasi beban torsi, kecepatan aktual atau respon kecepatannya tetap stabil meskipun diberikan berbagai variasi beban.

a. Kecepatan 1000 rpm tanpa beban



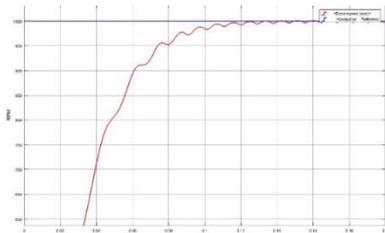
Gambar 17 Respon kecepatan 1000 rpm tanpa beban

Gambar 17 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID tanpa diberi beban. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1076.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1000 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan

selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.52%.

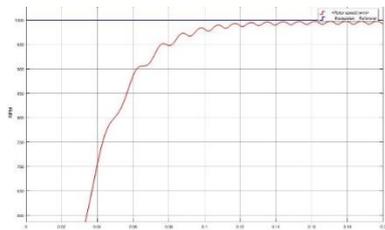
b. Kecepatan 1000 rpm beban 30 Nm

Gambar 18. merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 30 Nm. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1076.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1000 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 30 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1000 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.1%.



Gambar 18 Respon kecepatan 1000 rpm dengan beban 30 Nm

c. Kecepatan 1000 rpm beban 60 Nm

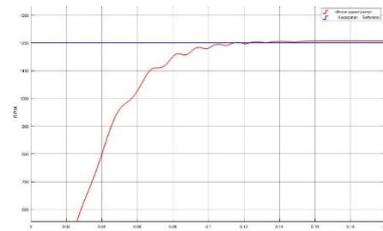


Gambar 19 Respon kecepatan 1000 rpm dengan beban 60 Nm

Gambar 19 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 60 Nm. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1076.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1000 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 60 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1000 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.5%.

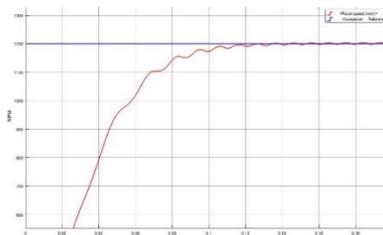
d. Kecepatan 1200 rpm tanpa beban

Gambar 4.20 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID tanpa diberi beban. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1276.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1200 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.68%.



Gambar 20. Respon kecepatan 1200 rpm tanpa beban

e. Kecepatan 1200 rpm beban 30 Nm



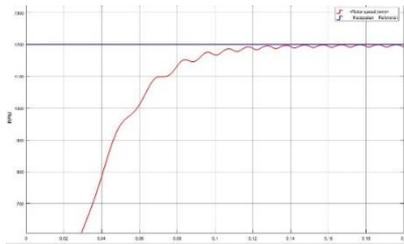
Gambar 21. Respon kecepatan 1200 rpm dengan beban 30 Nm

Gambar 21. merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 30 Nm. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1276.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1200 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 30 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1200 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.1%.

f. Kecepatan 1200 rpm beban 60 Nm

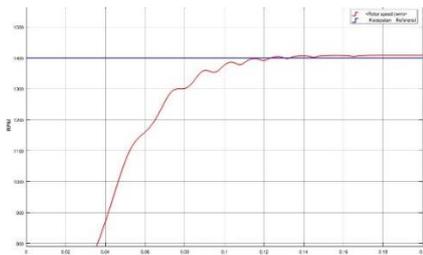
Gambar 22 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 60 Nm. Puncak

overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1276.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1200 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 60 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1200 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.3%.



Gambar 22. Respon kecepatan 1200 rpm dengan beban 60 Nm.

g. Kecepatan 1400 rpm tanpa beban



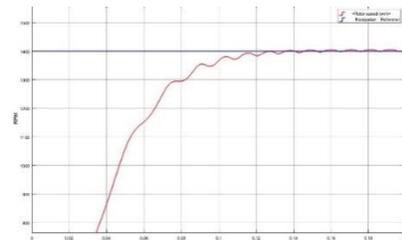
Gambar 23 Respon kecepatan 1400 rpm tanpa beban

Gambar 23. merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID tanpa diberi beban. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1476.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1400 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.4%.

h. Kecepatan 1200 rpm beban 30 Nm

Gambar 24. merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 30 Nm. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1476.1

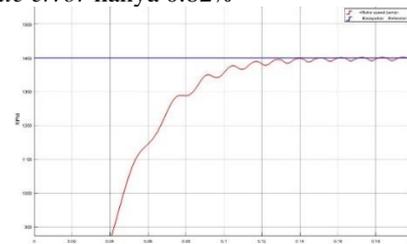
rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1400 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 30 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1400 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.2%



Gambar 24. Respon kecepatan 1400 rpm dengan beban 30 Nm.

i. Kecepatan 1400 rpm beban 60 Nm

Gambar 25 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan menggunakan kontrol PID dengan diberikan beban 60 Nm. Puncak overshoot sebelum menggunakan kontrol PID mencapai 1476.1 rpm dari kecepatan referensi yang diberikan yaitu 1400 rpm. Setelah menggunakan kontrol PID respon kecepatan selaras dengan kecepatan referensi yang diberikan. Meskipun motor diberikan beban 60 Nm, kecepatan motor tetap stabil di angka 1400 rpm, serta tanpa ada *overshoot* sebelum mencapai *steady state*. Nilai *steady state error* hanya 0.82%



Gambar 25 Respon kecepatan 1400 rpm dengan beban 60 Nm.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan data, penulis memperoleh kesimpulan yang diambil dari penelitian simulasi dan analisis inverter dengan topologi diode clamped 5-level untuk mengendalikan motor induksi tiga fasa. DCMLI 5 Level mampu meredam THD sebesar 24,65%, serta respon kecepatan motor induksi tetap stabil

sesuai kecepatan referensi yang diberikan meskipun motor diberikan variasi beban dengan mengguakan kontrol PID. Kecepatan referensi 1000 rpm, 1200 rpm, 1400 rpm, dengan masing-masing kecepatan diujicobakan dengan variasi beban 0 Nm, 30 Nm, dan 60 Nm tanpa adanya overshoot. Adapun kekurangan dari penelitian ini sebelum mencapai nilai *steady state* respon kecepatan terjadi sedikit osilasi. Didapatkan respon terbaik dengan *steady state error* terkecil 0.1% tanpa beban, serta *steady state error* terbesar 0.82% pada beban 60 Nm, serta THD 14,65%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.Venkadesen, Priyatosh P., Priti A. & Varun P. (2014). Cascade H-Bridge Multilevel Inverter For Induction Motor Drive. *eISSN:2319-1163. Vol:3 Issue 5. International Journal Of Research Engineering and Technology*
- [2] A. Chakravorty, A.K. Maurya, K.V. Singh, N. Upadhyay, & V.D Juyal (2018). Comparative Harmonic Analysis of Diode Clamped Multilevel Inverter. *Journal IEEE, Tula's Institute Engineering and Management.*
- [3] Dicky, & Ardiansyah. (2015). Analisa Topologi Baru PV-Inverter Melalui Penerapan Konsep Mutilevel pada Inverter HERIC (*Highly Efficient and Reliable Inverter Concept*). *Diploma Thesis, Universitas Andalas.*
- [4] Hasanah, R. N., Aliyan, L. R., & Muslim, M. (2014). Desain Inverter Tiga Fasa dengan Minimum Total Harmonic Distortion Menggunakan Metode SPWM. *Jurnal EECCIS Vol.8 No.1.*
- [5] Jain, M., Singh, A., & Singh, S. (2015). Comparative Analysis and Simulation of Diode Clamped & H-bridge Multilevel Inverter Using SPWM Technique. *Ijera.com. ISSN:2248-9622, vol.5 issue 1, 95-102.*
- [6] Matalata, H., & Hamid, M. (2016). Pengembangan Topologi Inverter *Multilevel* Tiga Tingkat Satu Fasa Tipe Diode Clamped dengan Mereduksi Komponen Saklar Daya. *ISSN:20302-2949. Vol:5, No.3. Universitas Andalas.*
- [7] N.K. Kumari, Poonam U., & Renu K. (2017). Qualitative Analysis of Diode Clamped Multi Level Inverter Fed Induction Motor with Phase Shifted SPWM. *IEEE International Conference on Power, Control, signal, and Instrumentation Engineering.* 817-822.
- [8] Ogata, Katsuhiko. Teknik Kontrol Otomatis. 1997. Jakarta : Erlangga.
- [9] Samman, F. A., Ahmad, R., & Mustafa, M. (2015). Perancangan, Simulasi dan Analisis Harmonisa Rangkaian Inverter Satu Fasa. *JNTETI Vol.4, No.1.*
- [10] Surjono, H. D. (2007). *Elektronika Teori dan Penerapan*. Jember: Penerbit Cerdas Ulet Kreatif.