

SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR TIGA FASA MENGGUNAKAN METODE *DIRECT TORQUE CONTROL* (DTC)

Septian Eko Nugroho

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: septiannugroho16050874012@mhs.unesa.ac.id

Widi Aribowo, Ibrohim, Aditya Candra Hermawan

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
Email : widiaribowo@unesa.ac.id, ibrohim@unesa.ac.id, adityacandrahermawan@unesa.ac.id

Abstrak

Artikel ilmiah ini merupakan pengembangan dari pengendalian kecepatan motor tiga fasa dengan metode *direct torque control* (DTC) dengan mensimulasikan menggunakan simulink. Pada studi ini, membahas pengendalian kecepatan motor 3 fasa yang banyak digunakan dalam dunia industri karena mempunyai banyak keunggulan diantaranya mudah dalam pemeliharaan, performanya yang handal, konstruksi yang kokoh, mempunyai efisiensi tinggi, dan harganya murah. namun, motor tiga fasa memiliki kekurangan diantaranya karakteristik motor yang sulit di kendalikan dan juga arus awal yang tinggi sehingga di butuhkan inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa berfungsi sebagai pengendali kecepatan motor tiga fasa dengan mengubah nilai frekuensi dan tegangan. Cara kerja inverter mengubah nilai frekuensi menjadi lebih kecil dengan mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC, kemudian di ubah menjadi tegangan AC lagi dengan frekuensi yang berbeda. Pengaturan tegangan dan frekuensi diberlakukan untuk kecepatan putaran dan torsi motor yang dibutuhkan. Metode yang digunakan untuk pengendalian kecepatan motor tiga fasa pada artikel ilmiah ini dengan *space vector pulse width modulation* (SVPWM) menggunakan DTC dengan perbandingan fluks. Skema model SVPWM menggunakan perbandingan control P dan PI dengan metode DTC. Hasil simulasi pengendalian motor tiga fasa menunjukkan metode DTC ini tidak sensitive terhadap perubahan pada tahanan stator sehingga perubahan pada beban mempengaruhi kecepatan motor. Metode DTC dapat mempersingkat kecepatan motor tiga fasa sampai stabil pada 0,22s hingga 0,5s dimana 0,5s diberi beban torsi $6N_m$, $12N_m$, $18N_m$, dan $24N_m$ sehingga terjadi penurunan kecepatan pada detik 0, 5s secara bertahap sesuai dengan beban torsi yang diberikan.

Kata Kunci: *direct torque control* (DTC), SVPWM, motor tiga fasa, inverter, *simulink*

Abstract

This scientific article is a development of three phase motor speed control by direct torque control (DTC) method by simulating using simulink. In this study, discussing the control of 3 phase motor speed which is widely used in the industrial world because it has many advantages including easy maintenance, reliable performance, sturdy construction, high efficiency, and low price. however, three-phase motors have shortcomings including motor characteristics that are difficult to control and also high initial currents so a three-phase inverter is needed. The three-phase inverter functions as a three-phase motor speed controller by changing the frequency and voltage values. How the inverter works to change the value of the frequency to be smaller by changing the AC voltage to DC voltage, then convert it to AC voltage again with a different frequency. Voltage and frequency settings are applied to the required rotation speed and torque of the motor. The method used for controlling three-phase motor speed in this scientific article with space vector pulse width modulation (SVPWM) uses DTC with flux comparison. The SVPWM model scheme uses a comparison of control P and PI with the DTC method. The results of a three-phase motor control simulation show that the DTC method is not sensitive to changes in stator resistance so that changes in load affect motor speed. The DTC method can shorten the speed of the three-phase motor until it is stable at 0.22s to 0.5s, where 0.5s are given a torque load of $6N_m$, $12N_m$, $18N_m$, and $24N_m$ so that the speed decreases at 0,5s in stages according to the torque load given.

Keywords: direct torque control (DTC), SVPWM, three phase motor, inverter, simulink

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi industri maupun komersil tak lepas dari pengendalian kecepatan motor tiga fasa,

pengendalian kecepatan motor tiga fasa semakin berkembang dan sudah banyak diterapkan dalam bidang industri maupun komersil. Keunggulan yang

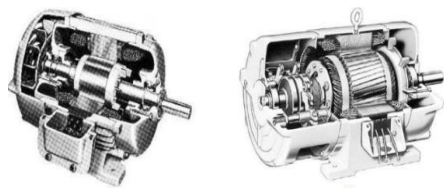
di tawarkan motor tiga fasa diantaranya mudah dalam pemeliharaan, performa yang handal serta efisiensi tinggi dalam penggunaannya, konstruksi motor tiga fasa yang kokoh, dan harganya relatif lebih murah. Dilihat dari keunggulannya terdapat juga terdapat kekurangan motor tiga fasa yaitu karakteristiknya kecepatan motor yang sulit untuk dikendalikan karena non-linier maka di perlukan penganturan kecepatan motor. Pengaturan kecepatan motor tiga fasa bisa dilakukan dengan control skalar atau kontrol tegangan per frekuensi (V/F), kontrol vektor yang berfungsi mengatur secara langsung arus stator yang di dihasilkan dari motor tiga fasa. Pengaturan secara langsung diantaranya dengan menggunakan DTC.

Direct torque control (DTC) merupakan metode yang bisa digunakan untuk mengatur torsi motor tiga fasa secara langsung (Khasanah dkk, 2017). Metode DTC memiliki startegi kontrol torsi dan fluk yang sangat baik untuk motor tiga fasa. Pengendalian motor tiga fasa dengan DTC menggunakan pengontrol histresis konvensional dari *ripple* torsi tinggi dan pemilihan variabel frekuensi (Mudhavath dkk, 2020).

Pada artikel ini peneliti membuat simulasi pengendalian kecepatan motor tiga fasa menggunakan metode *direct torque control* menggunakan *software* matlab 2018. Tujuan artikel ilmiah ini yaitu menganalisis pengendalian kecepatan motor tiga fasa melalui *space vector pulse-widht modulation* (SVPWM) inverter tiga fasa dengan menggunakan metode *direct torque control*.

Motor Tiga Fasa

Motor tiga fasa adalah alat atau mesin yang paling banyak digunakan pada berbagai peralatan industri. Cara kerja motor tiga fasa mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang mana stator menghasilkan medan magnet untuk memutar rotor dari pasokan tiga fasa yang seimbang. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, untuk melawan medan magnet dari stator. Jika penghubung belitan di beri tegangan masukan 3 fasa, maka arus 3 fasa berubah terhadap waktu sehingga terjadi fluki pada tiap fasa (Aribowo, 2019). Motor tiga fasa di tunjukan pada gambar 1.



Gambar 1. Motor 3 fasa (a) sangkar tupai dan (b) Rotor belitan (Hasibuan dkk. 2018)

Motor tiga fasa mempunyai dua pengendalian, yaitu hubungan *star* dan hubungan delta. Hubungan *star* dengan tegangan maksimal mencapai 630 V, sedangkan hubungan bintang tegangan maksimal mencapai 380 V. Motor tiga fasa memiliki daya yang tinggi dengan karakteristik sangkar tupai atau gulungan rotor dan penyalaan sendiri atau belitan rotor. Sebagai contoh penggunaan motor tiga fasa diantaranya, pompa, kompresor, *belt conveyer*, *glinder* dan jaringan listrik.

Pada umumnya praktek motor tiga fasa belum bekerja pada kecepatan sinkron. Namun, pada kecepatan dasar atau non linier. Berlangsungnya perbedaan laju tersebut dampak dari *slip* atau geseran yang meningkat seiring meningkatnya beban. *Slip* terjadi pada motor tiga fasa dan mengurangi *slip* maka dipasang cincin geser atau *slip ring*. *slip ring* motor sehingga di peroleh persamaan sebagai berikut:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (1)$$

Keterangan:

$$S = \text{slip}$$

$$N_s = \text{kecepatan putaran stator (rpm)}$$

$$N_r = \text{kecepatan putaran rotor dalam (rpm)}$$

Tegangan dan frekuensi yang ditiga fasakan rotor tergantung *slip* dengan persamaan sebagai berikut:

$$f_2 = sf \quad (2)$$

$$E_2 = c \quad (3)$$

Keterangan,

$$f_2 = \text{frekuensi tegangan dan arus rotor (Hz)}$$

$$f = \text{frekuensi sumber terhubung stator (Hz)}$$

$$s = \text{slip atau geseran}$$

$$E_2 = \text{tegangan induksi rotor ketika slip (V)}$$

$$sE_{OC} = \text{tegangan open circuit rotor yang di tiga fasakan ketika istirahat. (V}_{oc})$$

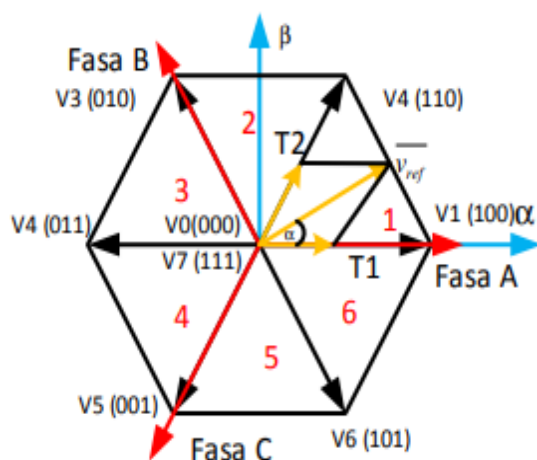
Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa merupakan komponen atau alat elektronik dengan mengkonversikan arus searah serta tegangan tiga fasa menjadi arus bolak balik (Aliyan dkk, 2015). Sinyal output menghasilkan tegangan dan arus tiga fasa dimana setiap fasa mempunyai beda sudut 120° (Yusuf, 2019).

Prinsip kerja inverter tiga fasa yaitu mengatur frekuensi dan tegangan yang digunakan untuk menghasilkan laju dan torsi sesuai kebutuhan. Sederhananya cara kerja inverter tiga fasa mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dengan frekuensi berbeda. Mengubah tegangan DC ke tegangan AC membutuhkan mosfet (Rahman dkk, 2016). Tetapi,

ada yang memakai penyearah terkendali atau *thyristor rectifier*. Struktur inverter tiga fasa yang digunakan menggunakan *space vector pulse width modulation* (SVPWM) dengan 6 buah MOSFET. Setelah tegangan diubah perbaikan kualitas tegangan dengan menggunakan kapasitor, kemudian tegangan DC di ubah menjadi tegan AC lagi dengan menggunakan teknik *space vector pulse width modulation* (SVPWM). Teknik ini menghasilkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang di inginkan. Selain itu, penggunaan teknik SVPWM dapat menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil.

SVPWM merupakan sebuah teknik yang digunakan untuk menentukan sinyal termodulasi lebar pulsa sakelar inverter untuk menghasilkan tegangan tiga fasa yang di tentukan (Satiawan, 2015). Karena itu, memberikan lebih sedikit THD dan PF yang lebih baik. Prinsip kerja SVPWM bekerja ketika transistor bagian atas dinyalakan sedangkan transistor bawah dimatikan yang kemudian sinyal pulsa di teruskan ke inverter tiga fasa. Persamaan untuk tegangan kerangka acuan abc menjadi acuan $\alpha\beta$ terdiri dari sumbu α dan sumbu β , sehingga di dapat dua vektor nol dan enam vektor aktif, yang kemudian di petakan dalam bentuk hexagonal dengan perbedaan sudut 60° pada gambar 2.



Gambar 2. Pensaklaran Vektor dan Sektor (Purnata dkk, 2017)

Pengaturan motor tiga fasa menggunakan inverter mempunyai banyak keunggulan diantaranya, jangkauan tinggi dalam mengatur laju dan torsi motor tiga fasa, memiliki *akseleration* serta *deseleration* yang bisa diatur sesuai kebutuhan, mempermudah dalam pengecekan, mengurangi arus *starting* motor tiga fasa, sistem proteksi yang bagus, memperhalus *starting* putaran motor, dan menghemat penggunaan energi listrik. Namun, di balik keunggulan inverter terdapat kekurangan diantaranya biaya perawatan dan harga beli yang mahal.

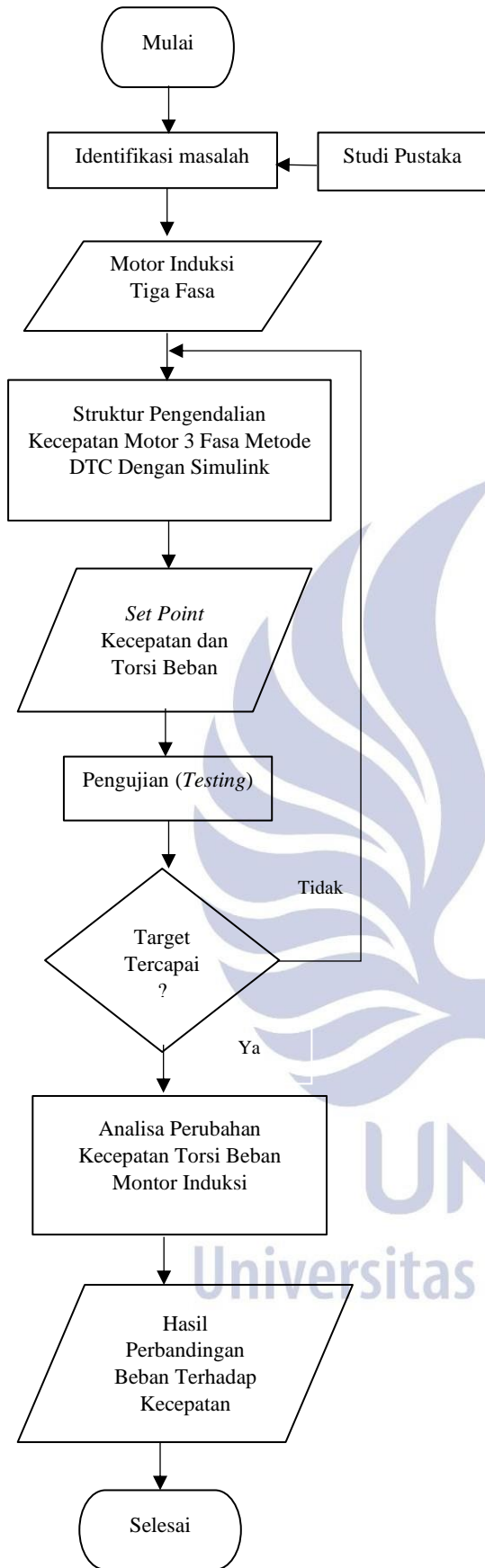
Direct Torque Control (DTC)

DTC merupakan skema laju putaran motor tiga fasa berdasarkan fluks stator dan torsi secara langsung dengan respon cepat yang di implementasikan pada motor tiga fasa atau motor arus bolak-balik. Metode DTC ini meliputi perhitungan torsi motor sesuai tegangan dan arus motor dan estimasi fluks. Fluks diestimasi menurut tegangan dari stator, sedangkan torsi diestimasi dari vektor *estimator* fluks stator dan rotor (Mukti, 2015). Kemudian torsi dan magnitude fluks di estimasi dan dibandingkan dengan nilai referensi. Keunggulan DTC diantaranya performa yang dinamik, pada perubahan parameter tahanan stator tidak sensitif. Namun, DTC yang konvensional mempunyai kelemahan diantaranya torsi yang tinggi dalam keadaan *steady state* dan dapat menimbulkan fluktuasi pada *ripple* fluks (Faizi dkk, 2017). Masalah ini di sebabkan karena histeresis, sehingga pengurangan torsi dan fluks *ripple* dapat dicapai jika meningkatkan frekuensi pensakelaran (Kumar dkk, 2017).

Skema dari metode DTC lebih terlihat sederhana dibandingkan dengan kontrol vektor karena konfigurasi dasarnya terdiri *controller histeresis* fluks dan torsi, *estimator* fluks dan torsi, *switching table*, dan *inverter*. Komparator *histeresis* fluks dan torsi sebagai kontroler untuk menentukan pergeseran vektor tegangan inverter yang sesuai dengan ketentuan dimana selisih fluks dan torsi sebagai acuan dengan fluks dan torsi hasil estimasi merupakan kesalahan fluks dan torsi sehingga menghasilkan masukan fluks dan torsi komparator. permasalahan yang terjadi dan dikaitkan dengan teknik pengendalian motor tiga fasa menggunakan DTC adalah nilai estimasi fluks stator tidak akurat sehingga dapat berdampak pada kinerja pengaturan kecepatan motor dan nilai frekuensi pergeseran vektor tegangan mempengaruhi nilai torsi dan fluks *histeresis* pada komparator.

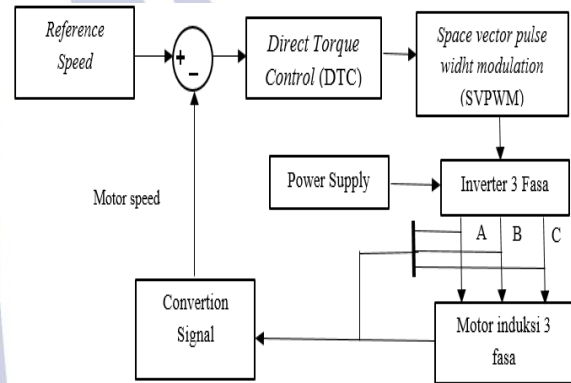
METODE PENELITIAN

Peneliti artikel ini berimplementasi dengan mensimulasikan pengontrolan laju motor tiga fasa dengan memanfaatkan simulink di matlab. Metode penelitian yang digunakan menggunakan *direct torque control* (DTC). Dengan metode tersebut pengendalian atau pengaturan kecepatan berdasarkan fluks dan torsi dari motor tiga fasa. *Flowchart* pengaturan laju motor tiga fasa dengan simulasi di matlab pada gambar 4.



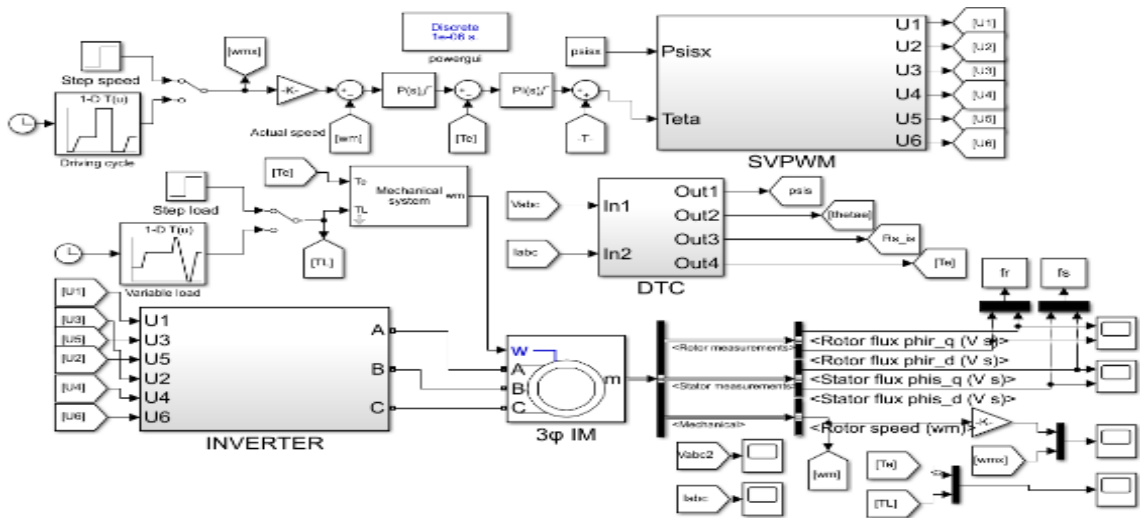
Gambar 3. Flowchart Penelitian

Flowchart di atas menjelaskan proses penelitian pengaturan laju motor tiga fasa dengan metode DTC. Identifikasi masalah sebagai referensi mengambil dari studi pustaka, input berupa motor tiga fasa kemudian pembuatan struktur pengaturan laju motor tiga fasa dengan *simulink*. Mengatur *set point* kecepatan dan torsi beban sesuai pengujian untuk di teruskan ke proses atau *running*. Terdapat kemungkinan dengan ketentuan target tercapai, jika ya maka akan di teruskan ke proses analisa perubahan kecepatan torsi beban motor tiga fasa, jika tidak maka terjadi *feedback* ke *simulink*. Pada proses analisa dilakukan perbandingan pada torsi berbeban, kemudian *output* berupa hasil perbandingan beban terhadap kecepatan. Model pengendalian kecepatan motor tiga fasa dengan SVPWM menggunakan DTC dan diagram blok dari simulasi pada gambar 4.



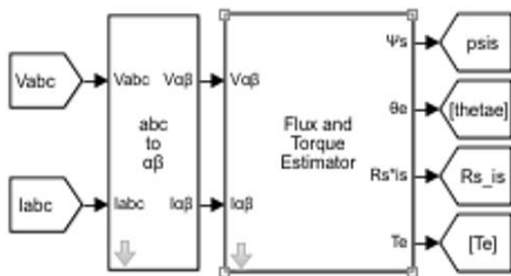
Gambar 4. Blok diagram simulasi

pada pengendalian kecepatan motor tiga fasa, nilai masukan menggunakan *reference speed* berupa kecepatan yang akan diatur. Pada *direct torque control* (DTC) penegemudi mengatur kecepatan motor tiga fasa berdasarkan fluk stator dan torsi secara langsung dengan respon sinyal respon cepat. Kemudian diteruskan oleh SVPWM dimana berfungsi sebagai pensaklaran komponen *mosfet* pada inverter tiga fasa dengan sinyal *on* dan *off* secara bergantian. Pada inverter terjadi pengaturan tegangan dan frekuensi untuk mengatur kecepatan motor yang di butuhkan sehingga berbentuk sinyal ABC. Dari hasil keluaran inverter tiga fasa akan masuk ke pada motor tiga fasa sehingga motor dapat berputar sesuai referensi kecepatan yang di tentukan. Energi mekanik yang di hasilkan motor tiga fasa akan di konversikan menjadi sinyal digital yang kemudian diolah pada *direct torque control*. kontrol tersebut akan membandingkan putaran motor sesuai dengan referensi kecepatan menggunakan control P dan PI. Simulasi pengendalian kecepatan tiga fasa dengan DTC menggunakan simulink (Gambar 5).



Gambar 5. Bagan pengendalian kecepatan motor menggunakan DTC

Bagan diagram diatas merupakan bagian dari keseluruhan proses yang terdiri dari DTC, inverter, SVPWM, dan motor tiga fasa. Terdapat *scope* dimana di gunakan untuk mengecek atau menegetahui keluaran yang sudah di proses. Bagan *direct torque control* (DTC) ditunjukkan dengan gambar 6.



Gambar 6. Bagan alur *direct torque control* (DTC)

Pada bagan alur DTC terdapat *propotional* (P) dan *integral derivative* (PI) dimana sebagai pengontrol sinyal umpan balik dan juga pembanding antara P atau PI saat menggunakan metode DTC. *Propotional* memeberikan *output* proposional dengan kesalahan arus $e(t)$. Sedangkan *integral* memberikan tindakan untuk menghilangkan kesalahan stabil atau mencapai nilai nol. Rumus yang di dapatkan sebagai berikut:

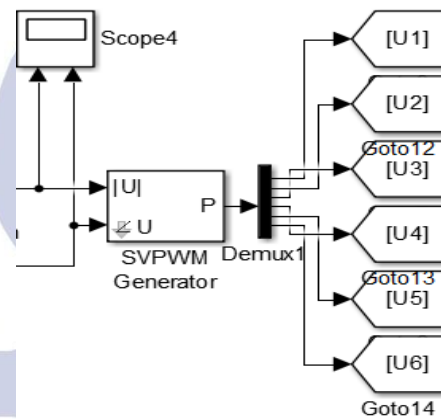
$$K_P e(t) \tag{4}$$

$$K_I \int e(\tau) d\tau \tag{5}$$

Keterangan :

- K_P = Koefisien *propotional*
- K_I = Koefisien *Integral*
- $e(t)$ = error (selisih antara *set point* dengan level *actual*)
- t = Waktu (s)

Bagan *space vector pulse widht modulation* (SVPWM) ditunjukkan dengan gambar 7.



Gambar 7. Bagan SVPWM

Teknik konverter PWM menggunakan SVPWM dimana menghasilkan enam pulsa yang dibutuhkan konverter sumber tegangan tiga fasa (VSC) dua tingkat yang terdiri dari perangkat *switching* setengah jembatan. Ketika parameter tipe SVPWM diatur sehingga dihasilkan secara internal, tegangan rms *line-to-line* yang dihasilkan VSC dengan menggunakan perhitungan sebagai berikut:

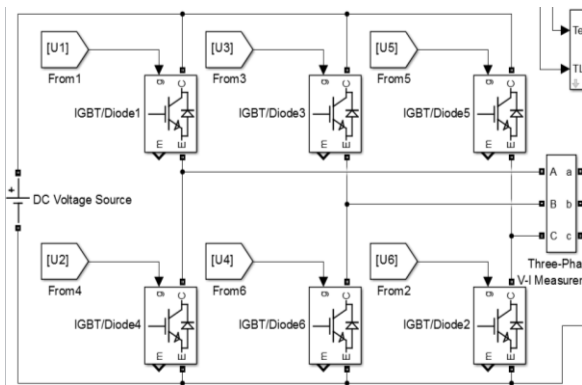
$$V_{out} = \frac{m \times V_{dc}}{\sqrt{3}} \tag{6}$$

Keterangan:

- V_{out} = Tegangan keluaran (V)
- m = Indek modulasi (rad)
- V_{dc} = Tegangan DC (V)
- \sqrt{x} = Fungsi akar kuadrat

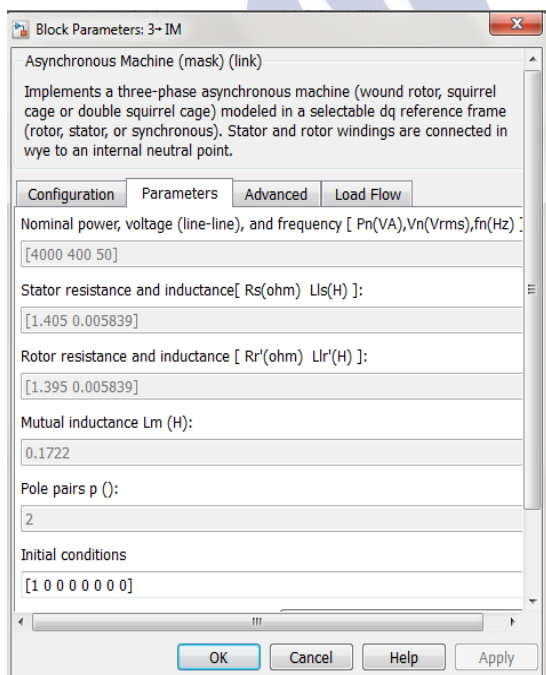
Dimana, m adalah index dari modulasi. Parameter input yang digunakan untuk referensi vektor menggunakan *magnitude-angle* (rad), frekuensi

PWM. Bagan inverter tiga fasa ditunjukkan dengan gambar 8.



Gambar 8. Bagan Inverter 3 fasa

Inverter menggunakan 6 buah MOSFET dimana dipasang secara paralel dengan keluaran tegangan tiga fasa dan frekuensi. Dengan input tegangan DC. Parameter motor tiga fasa yang di simulasikan dengan simulink ditunjukkan dengan gambar 9.



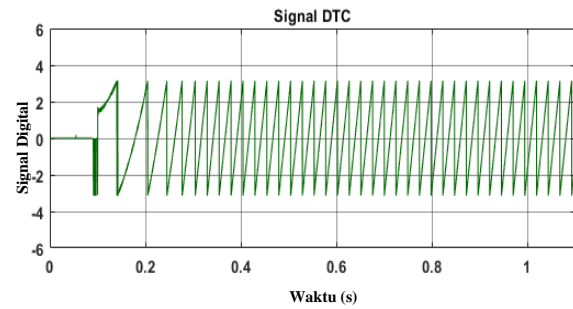
Gambar 9. Parameter motor tiga fasa 3 fasa

Parameter motor tiga fasa yang digunakan menggunakan 5,4 HP (*horse power*) dengan tegangan 400 V, frekuensi 50 HZ dan kecepatan 1430 RPM. Tipe rotor yang digunakan yaitu sangkar tupai. Sedangkan kekuatan mekanik (w) menggunakan *speed w* dengan *load flow* $1.492e+006$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang didapatkan dari simulasi pengontrolan motor tiga fasa dengan SVPWM memakai metode *direct torque control* (DTC) di dapatkan hasil sebagai berikut:

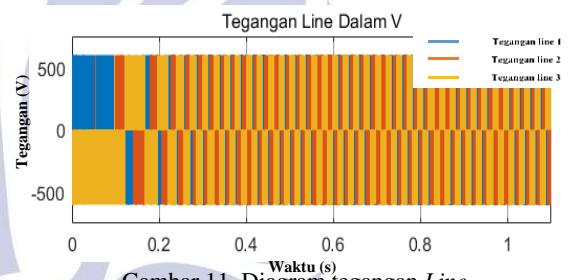
Sinyal Pulsa DTC



Gambar 10. Diagram sinyal pulsa fluks DTC

Dari proses DTC didapat sinyal DTC. Sinyal DTC tersebut akan masuk pada SVPWM, yang mana pada SVPWM akan diubah menjadi sinyal PWM kemudian sinyal PWM akan di teruskan pada inverter. Dari detik 0,1 s mulai ada lonjakan berupa lebar pulsa dengan lebar 0.02, kemudian pada detik 0,25 s sinyal sudah mulai stabil dan dapat mengontrol SVPWM.

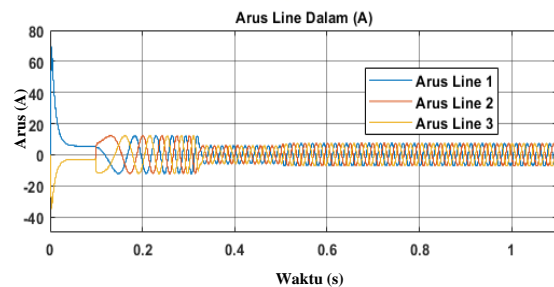
Tegangan Line



Gambar 11. Diagram tegangan Line

Tegangan terbaca 600 V dan berbentuk menyerupai gelombang sinus akan tetapi berbentuk persegi. Gelombang tersebut diakibatkan oleh sinyal pulsa 1 dan 0 dari inverter oleh karena itu terbentuk gelombang positif jika 1 dan negatif jika 0 yang kemudian di dipercepat dan di dapat kan hasil seperti gambar diagram tersebut.

Diagram Arus Line

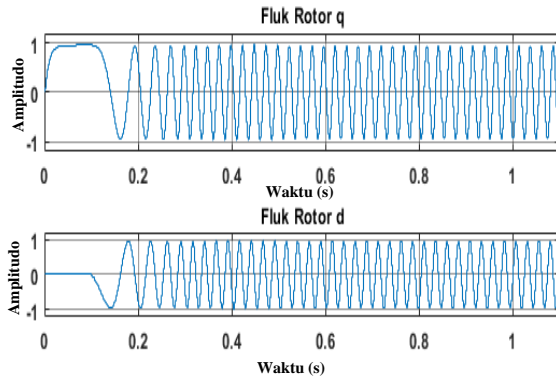


Gambar 12. Diagram arus line

Arus terlihat ada lonjakan pada detik 0 s sampai 0,02 s sebesar 82 A. Kemudian landai hingga detik ke 0,05 s sampai 0,1 s. Pada 0,3 s. Pada detik 0,35 s

mengalami penurunan sekitar 15 A hingga seterusnya.

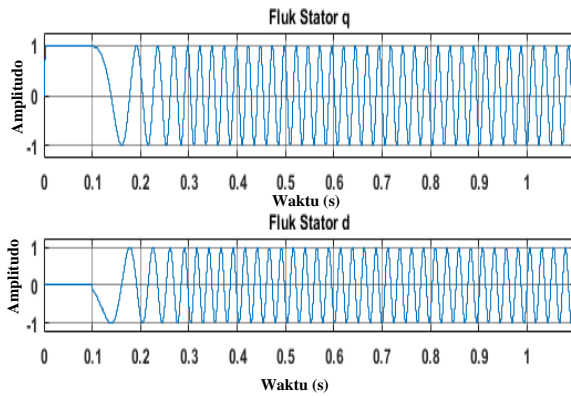
Fluk Rotor



Gambar 13. Diagram fluk rotor

Fluk rotor vektor sumbu q dari detik 0 hingga 0,1 landai dengan amplitudo 1 kemudian pada detik 0,32 naik hingga detik 0,63 dengan amplitudo 6 hingga seterusnya. Pada fluk rotor vektor sumbu d dari detik 0 hingga 0,25 s dengan amplitudo 1. Pada detik 0,29 s naik hingga detik ke 0,59 s dengan amplitudo 6 hingga seterusnya. Sumbu q dan d pada fluk rotor di sebagai perbandingan antara control P dan PI.

Fluk Stator



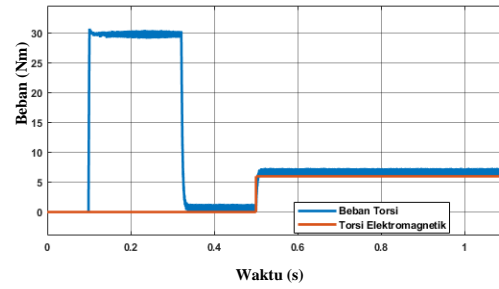
Gambar 14. Hasil diagram fluk stator

Fluk stator vektor sumbu q dari detik 0 s sampai 0,23 s dengan amplitudo 1, kemudian naik dari detik 0,25 s sampai 0,63 s dengan amplitudo 6 hingga seterusnya. Pada fluk stator vektor sumbu d dari detik 0 s sampai 0,22 s dengan amplitudo 1, kemudian naik dari detik 0,24 s sampai 0,59 s dengan amplitudo 6 hingga seterusnya.

Beban Torsi

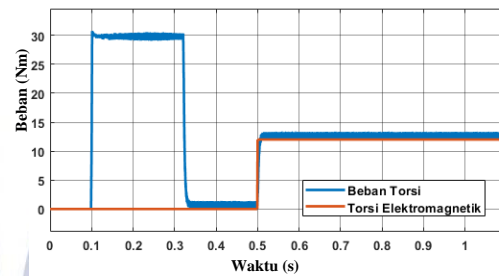
Beban Torsi yang di ujikan menggunakan 4 percobaan perbandingan :

1) **Beban Torsi 6 Nm**



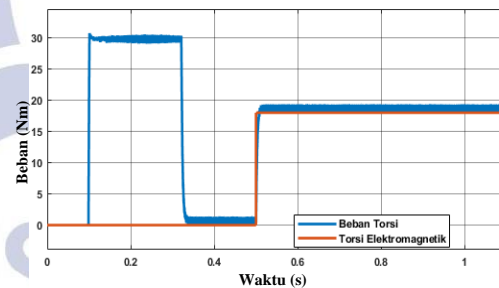
Gambar 15. Diagram beban torsi 6 Nm

2) **Beban Torsi 12 Nm**



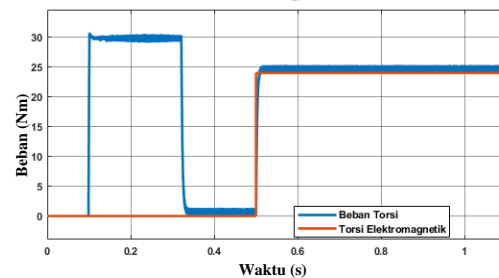
Gambar 16. Diagram beban torsi 12 Nm

3) **Beban Torsi 18 Nm**



Gambar 17. Diagram beban torsi 18 Nm

4) **Beban Torsi 24 Nm**



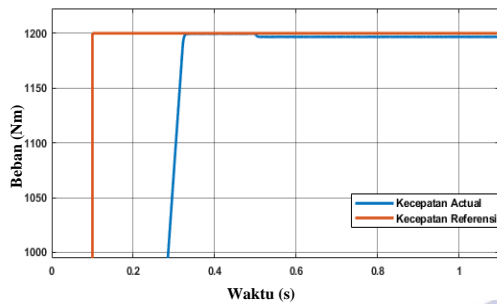
Gambar 18. Diagram beban torsi 6 Nm

Pada diagram tersebut *start* awal torsi tak terbeban mengalami lonjakan 30 Nm pada detik 0,1 s hingga detik 0,35 s, kemudian turun 0 Nm. Pada detik 0,5 s terjadi kenaikan di karena kan beban torsi dan stabil hingga seterusnya. Beban torsi yang di berikan yaitu 6 Nm , 12 Nm , 18 Nm , dan 24 Nm.

Speed atau Kecepatan

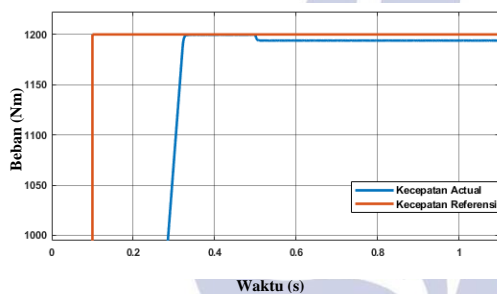
Kecepatan yang di ujikan menggunakan referensi 1200 rpm dari 4 percobaan:

1. Beban 25 % = 6 N_m



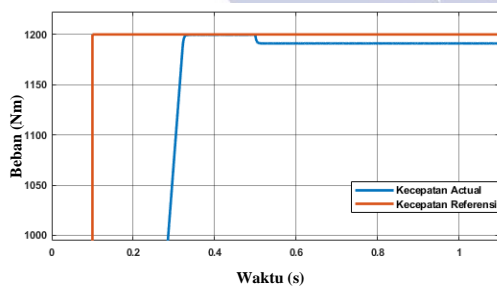
Gambar 19. Diagram kecepatan terhadap beban 25%

2. Beban 50 % = 12 N_m



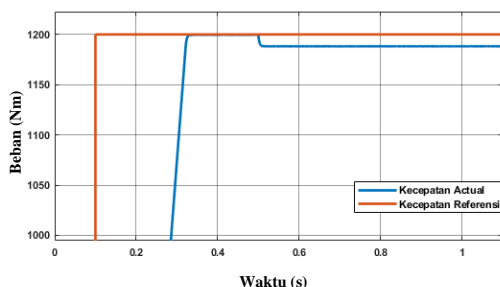
Gambar 20. Diagram kecepatan terhadap beban 50%

3. Beban 75 % = 18 N_m



Gambar 21. Diagram kecepatan terhadap beban 75%

4. Beban 100 % = 24 N_m



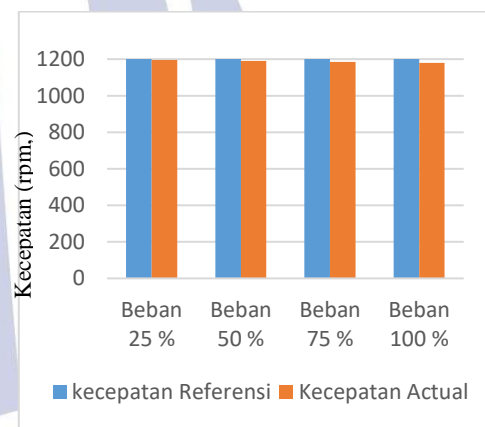
Gambar 22. Diagram kecepatan terhadap beban 100%

Reference speed merupakan masukan kecepatan yang akan diatur. Sedangkan actual speed merupakan hasil atau output kecepatan yang di dapatkan.

Pada diagram kecepatan aktual dari detik 0 s sampai detik 0,35 s mengalami kenaikan dengan kecepatan 1200 rpm. Pada detik 0,5 s terjadi penurunan kecepatan di karena beban torsi yang di berikan. Dari hasil tersebut di dapatkan tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Kecepatan Terhadap Beban

Beban Torsi	Kecepatan Referensi (rpm)	Kecepatan Actual (rpm)
25 %	1200	1195
50 %	1200	1190
75 %	1200	1185
100 %	1200	1180



Gambar 23. Grafik kecepatan motor tiga fasa Terhadap Beban Torsi

KESIMPULAN

Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kontroler P dan PI dengan SVPWM menggunakan metode DTC dapat mempersingkat kecepatan motor tiga fasa tiga fasa sampai stabil pada 0,35 s hingga seterusnya mencapai kecepatan 1200 rpm dalam keadaan tak berbeban. Pada detik ke 0,5 s diberikan beban torsi 6 N_m dengan kecepatan yang di dapat 1195 rpm, beban torsi 12 N_m dengan kecepatan yang di dapat 1190 rpm, beban torsi 18 N_m dengan kecepatan torsi yang di dapat 1185, dan beban torsi 24 N_m dengan kecepatan 1180 rpm.

Pengaturan laju motor tiga fasa menggunakan DTC memiliki akurasi yang tinggi dimana dapat di buktikan dengan kecepatan aktual mengikuti laju dari kecepatan referensi.

SARAN

Untuk kesempurnaan dan tercapainya artikel ilmiah ini, penulis merekomendasikan untuk menyempurnakan sistem kontrol DTC menggunakan PID dan Fuzzy Logic.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariowo, Widi. 2019. "Sistem proteksi Motor Berbasis Motor Manajemen Relay GE Multilin S469 Pada Motor *Primary Air Fan* di PLTU PAITON Unit 7". Universitas Negeri Surabaya. Vol. 02, No. 02. Hal 1-8
- Faizi, Nur dan Marzuarman. 2017. "Pengontrolan Fluks Dan Torsi Pada Motor Tiga fasa 3 Fasa Menggunakan Metode *Direct Torque Control* (DTC) Berbasis PI". Universitas negeri Bengkalis, Riau. Vol. 07, No. 02. Hal 139-145
- Aliyan, Lalu Riza., Hasanah, Rini Nur., dan Muslim, M.Aziz. 2015. "Desain Inverter Tiga Fasa Dengan Minimum *Total Harmonic Distortion* Menggunakan Metode SPWM". Universitas Brawijaya. Vol. 08 No. 01 Hal 79-84
- Hasibuan, arnawan., dan Zaymapa, Igo nanda Deka. 2018." Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTVAR 12P". Fakultas teknik Universitas Malikusaleh Lhokseumaw, Aceh. Hal 25-34
- Purnata, Hendi., Risdhayanti, Anindya Dwi., Putri, Shabrina Adani., dan Komarudin, Achmad. 2017. "Penerapan Metode *Hysteresis Space Vector Pulse Widht Modulation* Pada Inverter Tiga Fasa Untuk Pengaturan Kecepatan Dan Efisiensi Motor Tiga fasa". Politeknik Negeri Malang. Vol. 07 No 02 Hal 111-118
- Khasanah, Ulfatun.,Supari, dan Heranurweni, Sri. 2017. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan *Direct Torque Control* Menggunakan MATLAB". Universitas Semarang. Vol. 09 No.01 Hal 13-16
- Mukti, Harrij. 2014. "Impelementasi *Direct Torque Control* Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Tiga fasa". Politeknik Negeri Malang. Vol. 12 No. 01 Hal. 64-73
- Kumar, K.V Praveen., Kumar, T.Vinay., & Rao, S,Srinivasa. 2017. "*Analysis, Design and Implementation of Direct Torque Controlled Induction Motor Drive Based on Slip Angle*". *Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, Warangal, India*. Vol. 37 No. 2 Hal. 208-2019
- Satiawan, I Nyoman Wahyu., Citarsa, Bagus Ida Fery., dan Supriono. 2015. "Perbandingan Kinerja Teknik Modulasi Inverter Dua-Level Untuk Pengaturan Motor Induksi Tiga-Fase". Universitas Mataram. Hal. 35-41
- Mudhavath, Sriramulu Naik., dan Rao, Gudapati Sambasiva. 2020. "*Direct Torque Control Of MMC FED 3-Phase Induction Motor Using Fuzzy Logic Controller*". *Departement of Guntur, India* Vol. 29 No. 06 Hal. 2113-2121
- Rahman, Tawfikur., Mutakabber, dan Ibrahimy. 2016. "*Design Of a Switching Mode Three Phase Inverter*". *Department of Electrical and Computer Engineering, International Islamic University Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia*. Hal.155-160
- Yusuf, Muhammad. 2019. "Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Tiga fasa Tiga Fasa Dengan *Switching Space Vector Pulse Width Modulation*". Teknik Elektro, Politeknik Negeri Cilacap. Hal. 24-31