

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN MENGGUNAKAN PEMODELAN SISTEM (DTC) *DIRECT TORQUE CONTROL*

K. R. S. Suda¹⁾, E. Purwanto²⁾, B. Sumantri³⁾, H. H. Fakhruddin⁴⁾, A. A. Muntashir⁵⁾, M. R. Rusli⁶⁾

¹²³⁴⁵Pascasarjana Terapan Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
⁶ PT. Garda Energi Nasional Indonesia
Email: redasetiawan1@gmail.com

ABSTRAK

Motor induksi 3 fasa banyak ditemui dalam dunia perindustrian karena kelebihan yang dimilikinya, yaitu kuat, konstruksi yang sangat sederhana, dan harganya relatif murah, mempunyai efisiensi yang tinggi, *power factor* yang cukup baik, dan perawatannya lebih mudah. Disamping kelebihan motor induksi juga memiliki kelemahan, yaitu motor induksi tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan beban. Apabila terjadi perubahan beban maka kecepatan motor induksi akan menurun. Salah satu metode pengaturan kecepatan motor induksi yang dikembangkan selain vektor kontrol adalah metode *Direct Torque Control* (DTC). Metode kontrol DTC memungkinkan pengaturan fluks dan torsi secara langsung dan terpisah serta dapat dilakukan dengan vektor menggunakan sensor kecepatan. Estimasi putaran rotor, torsi dan fluks dilakukan oleh DTC yang diberi masukan tegangan dan arus stator. Untuk mencapai fluks dan torsi yang dikehendaki digunakan estimasi sebagai umpan balik pada sistem kontrol. Pada artikel ini akan disimulasikan pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode DTC, dengan menerapkan metode DTC pada motor induksi 3 fasa menghasilkan respon *speed* dan torsi yang *reliable*. Pemodelan diaplikasikan menggunakan fasilitas *Simulink* dan *Power System Blockset* dari MATLAB 6.0.

Kata kunci: Motor induksi, DTC, Simulink Matlab

ABSTRACT

Three-phase induction motors are often found in the industrial world because of their advantages, namely strong, very simple construction, and relatively cheap price, high efficiency, good power factor, and easier maintenance. Besides the advantages of the induction motor, it also has a weakness, namely the induction motor is not able to maintain a constant speed when there is a change in load. If there is a change in load, the speed of the induction motor will decrease. One of the induction motor speed regulation methods developed in addition to vector control is the Direct Torque Control (DTC) method. The DTC control method allows direct and separate adjustment of flux and torque and can be done vectorially using a speed sensor. The estimation of rotor rotation, torque and flux is carried out by DTC which is inputted with stator voltage and current. To achieve the desired flux and torque estimation is used as feedback to the control system. In this article, we will simulate the speed regulation of an induction motor using the DTC method, by applying the DTC method to a 3-phase induction motor to produce a reliable speed and torque response. The modeling was applied using Simulink and Power System Blockset facilities from MATLAB 6.0.

Keywords : Induction Motor, DTC, Simulink Matlab

1. PENDAHULUAN

Motor dc adalah motor yang paling ideal untuk pengemudian elektrik (*electric drive*), karena arus medan dan arus jangkar dapat dikontrol secara terpisah (*decoupled system*). Disamping itu kecepatan motor dapat dikontrol tanpa bantuan konverter. Namun adanya komutator didalam motor dc membutuhkan pemeliharaan yang rutin, ini menyebabkan sistem kurang handal (*reliable*). Karena itu penggunaan motor dc pada industri-industri mulai tergeser oleh motor ac [1] [2].

Selama beberapa tahun terakhir ini, telah banyak dilakukan penelitian mengenai sistem pengaturan kecepatan pada motor arus bolak-balik (motor AC) tanpa menggunakan sensor. Motor induksi, khususnya tipe motor rotor sangkar merupakan motor AC yang banyak digunakan pada dunia industri, salah satunya motor induksi 3 fasa. Motor induksi 3 fasa adalah alat penggerak yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang sederhana, kokoh, harganya relatif murah, serta perawatannya yang mudah. Sehingga motor induksi mulai menggeser penggunaan motor dc pada industri. Pada motor induksi memiliki beberapa parameter yang bersifat non-linier, terutama resistansi rotor, yang memiliki nilai bervariasi untuk kondisi operasi yang berbeda. Hal ini yang menyebabkan pengaturan pada motor induksi lebih rumit dibandingkan dengan motor DC[3].

Untuk mengatasi kompleksitas di dalam pengaturan motor induksi maka diperlukan suatu metode pengaturan yang dapat mengatur kecepatan motor induksi seperti mengatur kecepatan motor DC. Salah satu metode pengaturan motor induksi adalah metode vektor kontrol yang berdasarkan hubungan pada kondisi dinamik. Pada metode vektor kontrol tidak hanya mengatur besar dan frekuensi kecepatan angular tetapi juga mengatur posisi dari vektor ruang tegangan, arus dan fluks stator[4].

Salah satu metode vektor kontrol yang banyak digunakan adalah Field-Oriented Control (FOC) yang dapat mengatur motor induksi seperti motor DC eksitasi terpisah. Akan tetapi, metode FOC mempunyai beberapa kekurangan yaitu membutuhkan transformasi koordinat, pengaturan arus, sensitif terhadap perubahan parameter dan sistem menjadi lebih kompleks. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan metode *Direct Torque Control* (DTC) yang struktur pengaturannya lebih sederhana dan tidak banyak perhitungan[5]. Metode DTC memungkinkan secara langsung mengatur kondisi *switching* pada inverter dengan *Space Vector Modulation*. Penerapan kontrol DTC pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa mampu memberikan hasil simulasi yang bagus dan stabil pada kecepatan dan torsi motor. DTC konvensional masih menggunakan kontroler PI berdasarkan pertimbangan tersebut, maka dalam artikel ini dikembangkan suatu pemodelan pengaturan kecepatan motor induksi, yang tujuannya membahas analisis torsi dan kecepatan pada motor induksi 3 fasa ketika dalam keadaan berbeban melalui pengaturan motor induksi 3 fasa. Pemodelan diaplikasikan melalui suatu simulasi pada perangkat lunak (*software*) menggunakan fasilitas *Simulink* dan *Power System Blockset* dari MATLAB 6.0.

2. METODE

Bahan utama yang digunakan dalam artikel ini yaitu berupa perangkat lunak (*software*) menggunakan fasilitas *Simulink* dan *Power System Blockset* dari MATLAB 6.0 .

Metode yang digunakan dalam artikel ini yaitu menggunakan metode pengembangan simulasi untuk pengaturan kecepatan I_q pada motor induksi 3 fasa menggunakan metode DTC.

DTC adalah kontrol berdasarkan fluks stator dalam kerangka referensi stator tetap menggunakan kontrol langsung dari *switching* inverter. Dasar dari DTC adalah perubahan torsi sebanding dengan slip antara fluks stator dan fluks rotor pada kondisi fluks bocor stator tetap. Pada motor induksi dengan rotor sangkar untuk waktu tetap rotor menjadi sangat besar, fluks bocor rotor berubah perlahan dibandingkan dengan perubahan fluks bocor stator [6][7].

Oleh karena itu, pada keadaan perubahan yang cepat fluks rotor cenderung tidak berubah. Perubahan cepat dari torsi elektromagnetik dapat dihasilkan dari putaran fluks stator, sebagai arah torsi. Dengan kata lain fluks stator dapat seketika mempercepat atau memperlambat dengan menggunakan vektor tegangan stator yang sesuai. Torsi dan fluks kontrol bersama-sama dan decouple dicapai dengan pengaturan langsung dari tegangan stator, dari error respon torsi dan fluks. DTC biasanya digunakan sesuai vektor tegangan dalam hal ini untuk memelihara torsi dan fluks stator dengan dua daerah histerisis.

Direct Torque Control pertama kali dikembangkan oleh *Takashi* dan *Nogushi* tahun 1986. Dasar dari metode DTC adalah perubahan torsi sebanding dengan slip antara fluks stator dan fluks rotor pada kondisi fluks bocor stator tetap. Oleh karena itu, pada keadaan perubahan yang cepat fluks rotor cenderung tidak berubah. Perubahan cepat dari torsi elektromagnetik dapat dihasilkan dari putaran fluks stator, sebagai arah torsi. Dengan kata lain fluks stator dapat seketika mempercepat atau memperlambat dengan menggunakan vektor tegangan stator yang sesuai. Torsi dan fluks dikontrol bersama-sama dengan pengaturan langsung dari tegangan stator, dari error respon torsi dan fluks [8][9]. Untuk menentukan putaran motor dapat digunakan persamaan rangkaian dan arus motor diukur pada *reference frame*, sehingga persamaan tegangan stator dalam kerangka stator referensi adalah :

$$\bar{v}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda}_s = \int (\bar{v}_s - R_s \bar{I}_s) dt \quad (2)$$

Dengan demikian fluks linkages dalam koordinat stator *reference frames* dihitung berdasarkan:

$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s I_{qs}) dt \quad (3)$$

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s I_{ds}) dt \quad (4)$$

Sehingga besarnya fluks stator adalah:

$$\lambda_s = \sqrt{(\lambda_{qs})^2 + (\lambda_{ds})^2} < \Phi_{fs} \quad (5)$$

$$\Phi_{fs} = \tan^{-1} \left[\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right] \quad (6)$$

Persamaan torsi elektromagnetik adalah :

$$T_e = \frac{3p}{2} (i_{qs}\lambda_{ds} - i_{ds}\lambda_{qs}) \quad (7)$$

Frekuensi listrik dihitung dengan mendifferensialkan sudut vektor fluks rotor yaitu :

$$\omega_e = \frac{\lambda_{qs}\lambda_{ds}' - \lambda_{ds}\lambda_{qs}'}{\lambda_s^2} \quad (8)$$

Persamaan kecepatan rotor adalah :

$$\omega_r = P \left(\omega_e - R_r \frac{T_e}{\lambda_r} \right) \quad (9)$$

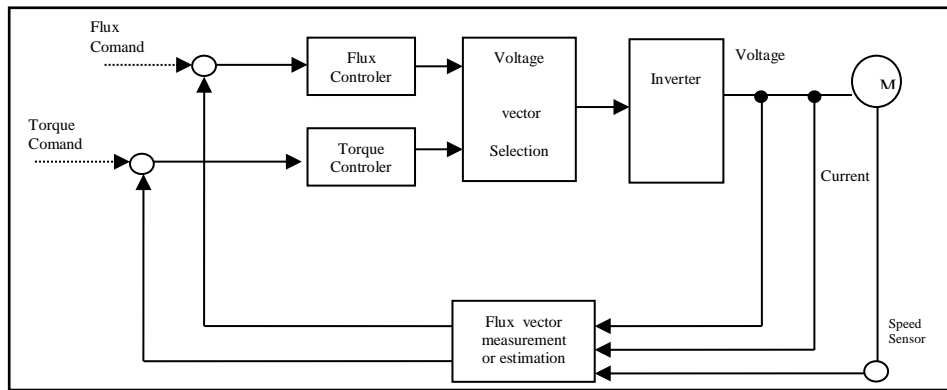
Dengan : \vec{v}_s = vektor tegangan stator

\vec{I}_s = vektor arus stator

R_s = tahanan stator

$\vec{\lambda}_s$ = vektor fluks stator

Blok diagram DTC dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Blok Diagram DTC

Komparator Histerisis

Pada metode DTC, controller yang digunakan untuk mengatur kesalahan fluks dan torsi pada daerah histerisisnya agar sesuai dengan fluks referensi dan torsi referensi menggunakan komparator hysteresis. Pada kesalahan fluks dihasilkan dua nilai histerisis yaitu -1 atau 1 dan pada kesalahan torsi dihasilkan tiga nilai histerisis yaitu -1,0 dan 1. Nilai kesalahan fluks dan torsi didapatkan dari persamaan berikut [10]:

$$\Delta_{te} = T_{ref} - T_{est} \quad (10)$$

$$\Delta\psi^2 = \psi_{ref}^s - \psi_{est}^s \quad (11)$$

Switching Table

Switching table berisi dua tabel yang memilih vektor tegangan tertentu sesuai dengan output dari flux dan torque hysteresis pembandingan. Algoritma pemilihan vektor tegangan inverter pada DTC untuk diterapkan pada motor induksi didasarkan pada nilai dari fluks dan torsi histerisis, serta nilai dari sektor fluks stator. Adapun aturan pemilihan tegangan pada *switching table* seperti ditunjukkan pada tabel 1[11].

Tabel 1. *Switching Table*

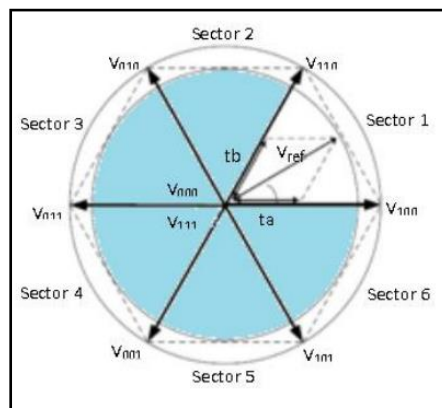
S_λ	S_T	S_θ
-------------	-------	------------

		Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6
1	1	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
1	0	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$
1	-1	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$
0	1	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
0	0	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$
0	-1	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(101)$	$V_4(011)$

nilai sektor fluks stator didapatkan dari :

$$\alpha = \angle \psi_s = \tan^{-1} \frac{\psi_{qs}}{\psi_{ds}} \quad (12)$$

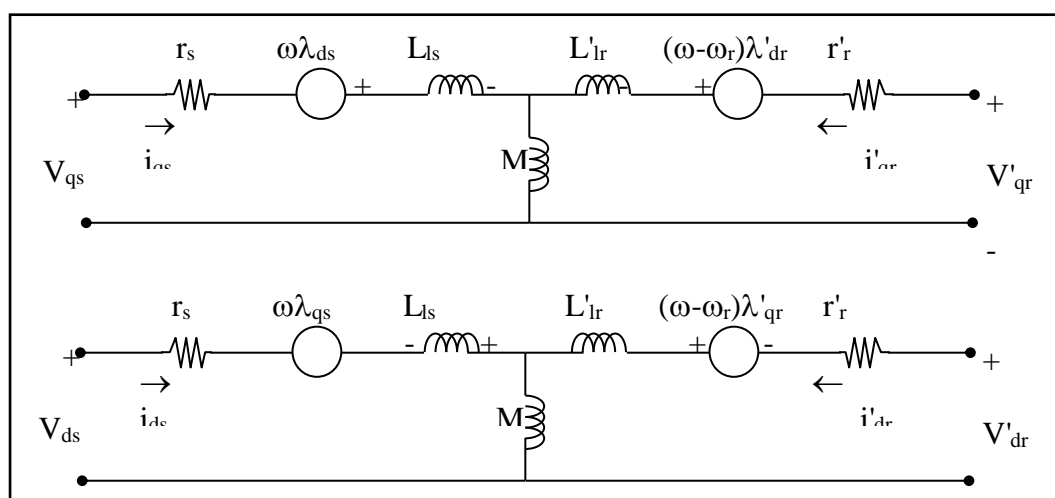
Vektor tegangan inverter dan sektor fluks dapat dilihat pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Vektor Tegangan Inverter dan Sektor Fluks

Model Motor Induksi

Model motor induksi AC diberikan oleh bentuk vektor ruang dari persamaan tegangan. Model sistem didefinisikan dalam stasioner α, β - sistem koordinat yang dipasang pada stator dinyatakan dengan persamaan berikut. Model motor seharusnya idealnya simetris dengan karakteristik rangkaian magnet linier. Konsep dasar motor induksi adalah menciptakan medan magnet yang berputar untuk didistribusikan pada air gap antara stator dan rotor [11]. Ada beberapa cara memodelkan motor induksi dalam beberapa kerangka acuan yang meliputi stationary, rotationary, dan synchronous. Model motor induksi dapat dihasilkan dari rangkaian ekuivalen motor induksi yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian ekivalen sumbu dq dalam kerangka acuan sinkron.

Kerangka referensi sinkron pada persamaan motor induksi meliputi tegangan stator, rotor dan flux linkage. Analisa tegangan stator dan rotor dapat dinyatakan oleh [12][13][14]:

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + \lambda_{qs} \frac{d}{dt} \\ V_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} + \lambda_{ds} \frac{d}{dt} \\ V_{qr} &= r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} + \lambda_{qr} \frac{d}{dt} \\ V_{dr} &= r_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} + \lambda_{dr} \frac{d}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

Untuk persamaan flux linkage stator ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \end{aligned} \quad (14)$$

Sedangkan untuk persamaan flux linkage rotor dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} \lambda_{qr} &= L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \lambda_{dr} &= L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \end{aligned} \quad (15)$$

Jika, Persamaan 14 dan 15 dinyatakan ke dalam sumbu dq dengan memasukkan tegangan rotor ($v_r = 0$), maka didapat besaran tegangan stator yang merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor dalam bentuk matrik, sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & \omega_e L_s & pL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & r_s + pL_s & -\omega_e L_m & pL_m \\ pL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & r_r + pL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_r & pL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & r_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dimana :

V_{qs} dan V_{qr} adalah tegangan stator dan rotor sumbu q-axis.

V_{ds} dan V_{dr} adalah tegangan stator dan rotor d-axis.

r_s dan r_r adalah tahanan stator dan rotor.

i_{qs} dan i_{qr} adalah arus stator dan rotor q-axis.

i_{ds} dan i_{dr} adalah arus stator dan rotor d-axis.

λ_{qr} dan λ_{qs} adalah flux stator dan rotor q-axis.

λ_{ds} dan λ_{dr} adalah flux stator dan rotor d-axis.

ω_r dan ω_e adalah kecepatan rotor dan sinkron.

L_{ls} dan L_{lr} leakage induktansi stator dan rotor.

L_m adalah magnetizing induktansi.

padalah $\frac{d}{dt}$

Torsi elektromagnetik (T_e) merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor, dinyatakan sebagai berikut:

$$T_e = \begin{pmatrix} 3 \\ - \\ 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ - \\ 2 \end{pmatrix} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (17)$$

Dimana p adalah jumlah pasang pole.

Karena rotor merupakan jenis *squirrel cage* yang terminalnya dihubung singkat, maka tegangan pada rotor diset = 0 ($v_r = 0$, sehingga Persamaan (16) tegangan rotor dinyatakan sebagai:

$$v_{qr} = 0 = L_m \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) L_m i_{ds} + \left(r_r i_r + L_r \frac{di_{qr}}{dt} \right) + (\omega_e - \omega_r) L_r i_{dr} \quad (18)$$

$$v_{dr} = 0 = L_m \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) L_m i_{qs} + \left(r_r i_r + L_r \frac{di_{dr}}{dt} \right) + (\omega_e - \omega_r) L_r i_{qr} \quad (19)$$

Dengan menggunakan Persamaan (12) didapatkan:

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} + r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} + r_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 \quad (21)$$

Dari Persamaan (15) diperoleh

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (22)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \quad (23)$$

Arus rotor dan dapat dihilangkan dari persamaan (20) dan (21) dengan menggunakan Persamaan (22) dan (23), maka diperoleh:

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \frac{L_r}{r_r} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{L_r} r_r i_{qs} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \frac{L_r}{r_r} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{L_r} r_r i_{ds} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 \quad (25)$$

Untuk pengaturan decoupling, maka komponen flux (λ_r) pada arus I_d harus di tempatkan selaras dengan sumbu d -axis, dan komponen torsi (T_e) pada arus (I_q) harus ditempatkan selaras dengan sumbu q -axis. Dengan sistem ini arus fluks dan arus torsi dapat diatur secara terpisah. Untuk memenuhi decoupled, maka:

$$\lambda_{qr} = 0 = \lambda_r = \lambda_{dr} \quad (26)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = 0 = \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \quad (27)$$

Substitusikan persamaan (26) ke dalam persamaan (22) dan (23), maka diperoleh:

$$I_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} I_{qs} \quad (28)$$

$$I_{dr} = \frac{\lambda_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} I_{ds} \quad (29)$$

Selanjutnya dari persamaan (27) di substitusikan ke persamaan (24) dan (25), diperoleh:

$$(\omega_e - \omega_r) = \omega_{sl} = \frac{L_m r_r}{\lambda_r L_r} I_{qs} \quad (30)$$

$$\frac{L_r}{r_r} \frac{d\lambda_r}{dt} + \lambda_r = L_m i_{ds} \quad (31)$$

Persamaan (31) dapat juga ditulis kedalam bentuk lain yaitu:

$$\lambda_r = \frac{L_m i_{ds}}{s\tau_r + 1} \quad (32)$$

Dimana:

$$\tau_r = \frac{L_r}{r_r} \text{ adalah konstanta waktu rotor dan } \frac{d}{dt} = s$$

Substitusikan persamaan untuk arus i_{qr} dan i_{dr} ke dalam persamaan (14), maka persamaan flux linkage menjadi:

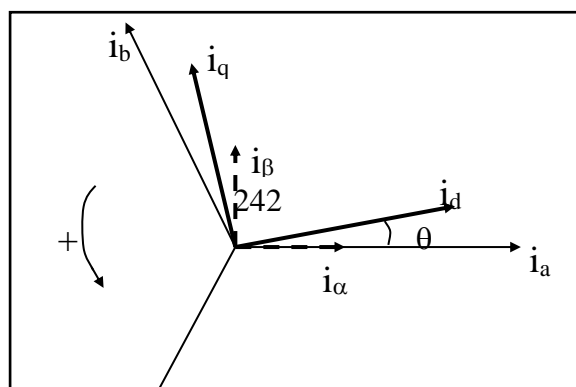
$$\lambda_{qs} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qs} \quad (33)$$

$$\lambda_{ds} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{L_m}{r_r} \lambda_{dr} \quad (34)$$

Selanjutnya substitusikan λ_{qs} dan λ_{ds} dari persamaan (33) dan (35) ke dalam persamaan torsi pada persamaan (17), maka diperoleh:

$$T_e = \begin{pmatrix} 3 \\ - \\ 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ - \\ 2 \end{pmatrix} \frac{L_m}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (35)$$

Transformasi Clarke didalam pada pemodelan motor induksi digunakan untuk mentransformasikan arus stator tiga fasa (i_a , i_b , dan i_c) pada bidang stasioner (*stationary reference frame*) ke arus stator ortogonal dua fasa (i_α dan i_β) pada bidang ortogonal (*orthogonal reference frame*). Sedangkan Transformasi Part digunakan untuk mentransformasikan arus stator (i_α dan i_β) ke arus stator dua fasa (i_{ds} dan i_{qs}) pada bidang putar (*rotating reference frame*). Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara vektor arus stator didalam bidang putar (komponen d ,q) dengan arus stator bidang stasioner (komponen a,b,c) [15].



Gambar 4. Hubungan antara vektor arus stator d,q (rotating reference frame) dengan arus stator a,b,c (stationary reference frame)

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem tiga fasa (a,b,c) ke sistem dua fasa ortogonal (α,β), serta mengacu pada persamaan decoupled yang telah dijabarkan sebelumnya, maka secara matematis persamaan-persamaan transformasi berikut dapat dirumuskan kembali sebagai berikut:

$$i_{\alpha} = i_a \quad (36)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (37)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (38)$$

Inverse transformasi Clarke digunakan untuk mentransformasi balik dari komponen α, β ke komponen a,b,c melalui persamaan berikut :

$$i_a = i_{\alpha} \quad (39)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta} \quad (40)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta} \quad (41)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem dua fasa ortogonal (α,β) ke sistem dua fasa (d,q) secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$i_{ds} = i_{\alpha} \cdot \cos(\theta) + i_{\beta} \cdot \sin(\theta) \quad (43)$$

$$i_{qs} = -i_{\alpha} \cdot \sin(\theta) + i_{\beta} \cdot \cos(\theta) \quad (44)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Inverse transformasi Part digunakan untuk mentransformasi balik dari komponen d,q ke komponen α, β melalui persamaan berikut :

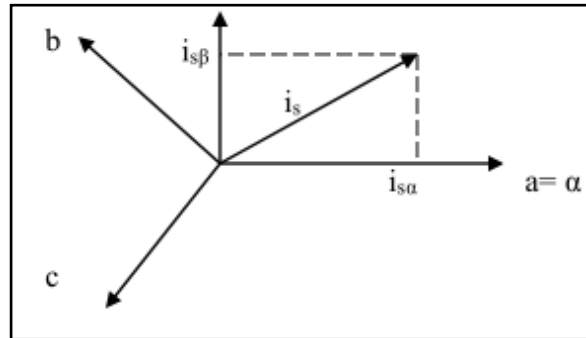
$$i_{\alpha} = i_{ds} \cdot \cos(\theta) - i_{qs} \cdot \sin(\theta) \quad (46)$$

$$i_{\beta} = i_{ds} \cdot \sin(\theta) + i_{qs} \cdot \cos(\theta) \quad (47)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Transformasi Clarke didalam *FOC* motor induksi digunakan untuk mentransformasikan arus stator tiga fasa (i_a, i_b dan i_c) pada bidang stasioner (*stationary reference frame*) ke arus stator ortogonal dua fasa (i_α dan i_β) pada bidang ortogonal (*orthogonal reference frame*). Sedangkan Transformasi Park digunakan untuk mentransformasikan arus stator (i_α dan i_β) ke arus stator dua fasa (i_{ds} dan i_{qs}) pada bidang putar (*rotating reference frame*). Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara vektor arus stator didalam bidang putar (komponen (d, q)) dengan arus stator bidang stasioner (komponen a, b, c).



Gambar 5. Proyeksi Arus Stator Menjadi Komponen $\alpha\beta$.

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem tiga fasa (a, b, c) ke sistem dua fasa ortogonal (α, β), serta mengacu pada persamaan decoupled yang telah dijabarkan sebelumnya, maka secara matematis persamaan-persamaan transformasi berikut dapat dirumuskan kembali sebagai berikut:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_a \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \end{aligned} \quad (49)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (50)$$

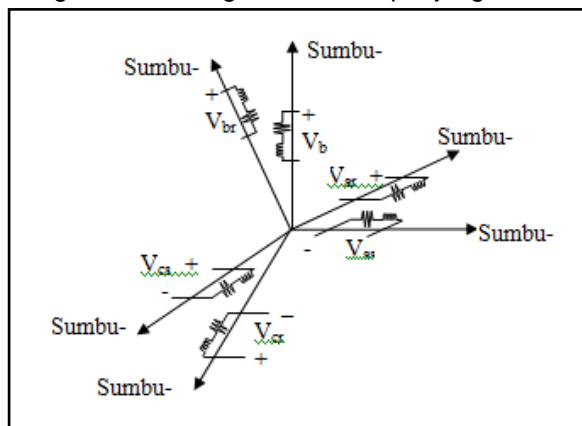
Invers transformasi Clarke digunakan untuk mentransformasi balik dari komponen α, β ke komponen a, b, c melalui persamaan berikut.

$$\begin{aligned} i_a &= i_\alpha \\ i_b &= -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \\ i_c &= -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \end{aligned} \quad (51)$$

atau dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (52)$$

Gambar 6 memperlihatkan rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa simetris bila ditinjau dalam rangkaian rotor yang berputar (*rotating frame*). Rangkaian stator digambarkan sepanjang sumbu-sumbu $a_s, b_s,$ dan e_s , sedangkan rangkaian rotor digambarkan sepanjang sumbu-sumbu $a_r, b_r,$ dan c_r .



Gambar 6. Stator dan rotor dari motor induksi dalam sistem koordinat a,b,c

Berdasarkan gambar tersebut dapat dijabarkan persamaan tegangan stator dan rotor sebagai berikut :

$$V_{abcs} = r_{s1}i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad (53)$$

$$V_{abcr} = r_{r1}i_{abcr} + p\lambda_{abcr} \quad (54)$$

dimana : $p=d/dt$, dan selanjutnya ;

$$p\lambda_{abcs} = L_{s1}i_{abcs} + L_{s1}i_{abcs} \quad (55)$$

$$p\lambda_{abcr} = L_{r1}i_{abcs} + L_{r1}i_{abcr} \quad (56)$$

Matriks L_s dan L_r dinyatakan sebagai

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (57)$$

dan

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (58)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan data spesifikasi dari motor induksi 3 fasa. untuk spesifikasi dari motor induksi 3 fasa dapat dilihat dari tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

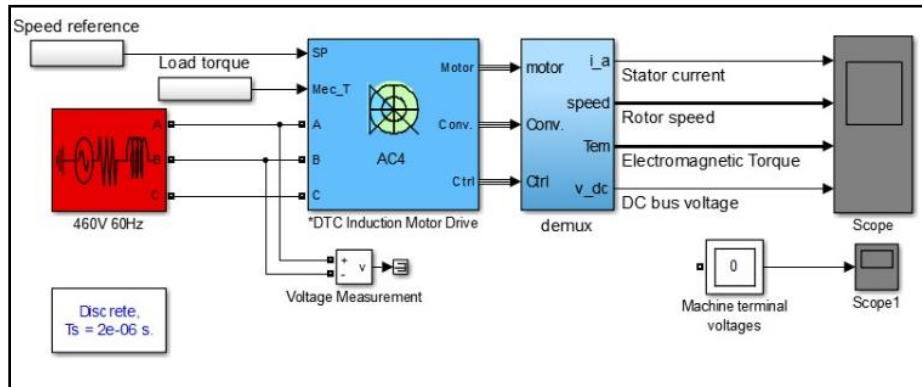
No	Spesifikasi	3 HP
1	Tegangan (Volt)	220V/380V
2	Frekuensi (Hz)	50 Hz
3	Daya (HP)	200 HP
4	Kecepatan (Rpm)	1430 Rpm
5	Jumlah Kutub	2
6	Tahanan Stator (Ohm)	0,435
7	Tahanan Rotor (Ohm)	0,816
8	Induktansi Stator dan Rotor (H)	0,002
9	Induktansi Magnetik (H)	0,069
10	Momen Inersia (Kg.m ²)	0,089
11	Koefisien Redaman (N.m.s)	0,02

Motor induksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah motor induksi jenis rotor sangkar (*squirrel-cage*) hubung bintang (Y), dimana dari motor induksi ini dapat diketahui besar tegangan atau arus tiap phasanya. Keluaran yang dihasilkan dari motor induksi tiga fasa ini terdiri dari sistem elektrik yaitu nilai fluks stator, torsi elektromagnetis dan sistem mekanis yaitu kecepatan putaran rotor. Perancangan simulasi DTC ini menggunakan motor induksi tenaga 200 HP dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 2.

Simulasi

Pemodelan simulasi DTCdikembangkan menggunakan program simulasi Matlab, *input* yang digunakan adalah fluks dan torsi acuan. Cara kerja DTC adalah dengan mempertahankan keluaran

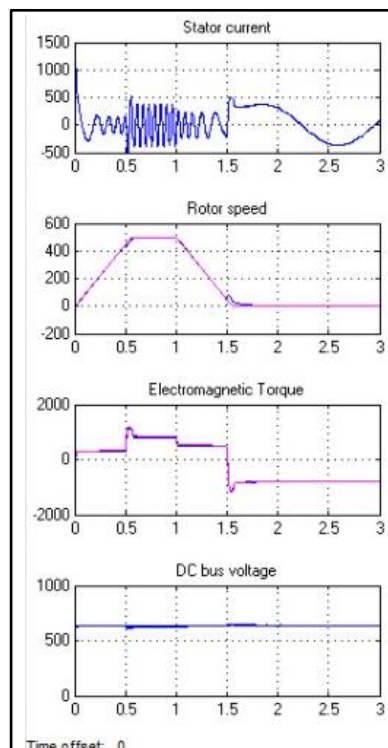
fluks dan torsi agar sesuai dengan referensi yang diberikan. Adapun bagian - bagian yang dirancang pada metode DTC ini adalah sudut fluks stator, komparator, sektor estimator, dan *switching table* dengan menggunakan persamaan-persamaan dan algoritma. Rangkaian simulasi DTC dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Simulasi DTC

Hasil

Hasil simulasi pada pengaturan kecepatan putaran motor induksi tiga fasa ini di lakukan dengan menggunakan Simulink pada Matlab. Rangkaian simulasi DTC ini ditunjukkan pada gambar 4. Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa dengan daya 200HP. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 5 dibawah ini.



Gambar 5. Hasil Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi dengan DTC

Analisis dan Pembahasan

Pada waktu $t = 0$ s, set point kecepatan adalah 500 rpm. Kecepatan pada rotor mengikuti dengan tepat jalan percepatan. Pada $t = 0,5$ s, torsi beban penuh diterapkan ke poros motor sementara kecepatan motor masih ramping ke nilai akhirnya. Ini memaksa torsi elektromagnetik meningkat ke nilai

maksimum yang ditentukan yaitu (1200 N.m) dan kemudian menjadi stabil pada 820 N.m setelah peningkatan kecepatan selesai dan motor telah mencapai 500 rpm. Pada $t = 1$ s, set point kecepatan diubah menjadi 0 rpm. Kecepatan menurun hingga 0 rpm dengan mengikuti jalan deselerasi secara tepat meskipun beban mekanis dibalik secara tiba-tiba, perpindahan dari 792 N.m ke - 792 N.m, pada $t = 1,5$ s. Tidak lama kemudian, hasil simulasi kecepatan motor stabil pada 0 rpm. Hasil simulasi tegangan DC pada $t = 0$ s sampai dengan 1,5 s menunjukkan bahwa masih terjadi osilasi, tetapi pada $t = 2$ s sampai dengan 3 s hasil simulasinya mulai stabil.

Dari hasil simulasi penggunaan kontrol DTC pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa melalui persamaan-persamaan pada teori dari DTC itu sendiri sudah sesuai dengan hasil gelombang yang dihasilkan. Hasil simulasi yang bagus tidak lepas dari pemodelan sistem yang didahului melalui persamaan-persamaan dari teori DTC tersebut. Simulasi DTC yang hasilnya sudah cukup bagus namun masih terdapat sedikit osilasi pada hasil gelombang, namun ini tidak mengurangi dari tujuan dibuatnya artikel ini. Untuk meningkatkan performa kinerja dari kecepatan motor induksi 3 fasa ini perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut nantinya yang bersifat nyata, seperti adanya *hardware* sehingga dapat dilihat dengan jelas bagaimana putaran motor induksi tersebut ketika berbeban maupun tanpa beban.

4. SIMPULAN DAN SARAN

Pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode *Direct Torque Control* (DTC) mempunyai respon dinamik yang tinggi, hal ini dapat dilihat dari kecepatan aktual dalam mengikuti kecepatan referensi. Respon torsi dari hasil simulasi memperlihatkan bahwa respon torsi yang dihasilkan dapat mengikuti torsi acuan yang diberikan. Respon kecepatan aktual motor induksi dipengaruhi oleh beban. Semakin besar beban yang diberikan akan mengakibatkan respon kecepatan aktual untuk mengikuti kecepatan referensi semakin lambat. Penggunaan kontrol DTC pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa mampu memberikan kriteria performa sistem kontrol yang tinggi, dengan menekan *overshoot* dan *steady state error* mendekati nol, serta *rise time* dan *settling time* relatif cepat.

Dalam artikel ini penggunaan kontrol DTC pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa sudah mampu memberikan hasil yang bagus, namun kedepannya perlu pengembangan serta penelitian terkait mengenai kontrol DTC dengan berbantuan neuro fuzzy atau ANFIS agar hasil simulasi dari pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa ini menjadi lebih sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mochamad Piono Mulyo, Dwi Ajiatmo, Machrus Ali Mochammad Nur Masrukhan, "OPTIMASI KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN PID DENGAN TUNING ANT COLONY OPTIMIZATION (ACO) CONTROLLER," *Prosiding SENTIA Politeknik Negeri Malang*, vol. 8, 2016.
- [2] Hidayatul Nurohmah, Machrus Ali Yanuangga Gala Hartlambang, "OPTIMASI KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN ALGORITMA KELELAWAR (BAT ALGORITHM)," *SEMANTIKOM*, 2017.
- [3] Abdul Azis H, Zulfikar Noorly Evalina, "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable logic controller," *Journal of Electrical Technology*, vol. 3, no. 2, Juni 2018.
- [4] Vicky Prasetya, Sugeng Dwi Riyanto, Arif Ainur Rafiq Muhamad Yusuf, "DESAIN SIMULASI SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN SWITCHING SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION," *ECOTIPE*, vol. 6, no. 1, April 2019.
- [5] Endro Wahjono, Ony Asrarul Qudsi Vania Kurnia Alvi, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Direct Torque Control," *INOVTEK Seri Elektro*, vol. 2, no. 3, Desember 2020.
- [6] Hadi Suyono, Abraham Lomi Mokh Suseno Aji Sari, "Analisis Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasadengan Metode Direct Torque Control (DTC) Berbasis PID Kontrol," *ECOTIPE*, vol. 7, no. 2, Oktober 2020.
- [7] S.A. Nasar I. Boldea, *Vector Control of AC Drives*. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc, 1992.
- [8] Septian Eko Nugroho, "SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR TIGA FASAMENGGUNAKAN METODE DIRECT TORQUE CONTROL (DTC)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 81-90, Januari 2021.

- [9] ABB Technical Guide, "Direct Torque Control," Rev C, vol. 6.6, 2001.
- [10] Supari, Sri Heranurweni Ulfatun Khasanah, "SIMULASI PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASA DENGAN DIRECT TORQUE CONTROL MENGGUNAKAN MATLAB," *eLEKTRIKAL*, vol. 09 no 1, pp. 13-16, 2017.
- [11] Agus Setiawan Ratna Ika Putri Mila Fauziah, "Penerapan Kontroler Neural Fuzzy Untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Pada Mesin Sentrifugal," *INKOM*, vol. III No.1-2, pp. 53-54, November 2019.
- [12] Era Purwanto, Hary Oktavianto, Muhammad Rizani Rusli, Handri Toar Ridwan, "DESAIN KONTROL KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN FUZZY PID BERBASIS IDIRECT FIELD ORIENTED CONTROL," *Jurnal Integrasi*, vol. 11, no. 2, pp. 148-158, Oktober 2019.
- [13] M.E.H. Benbouzid, D. Diallo M. Zeraouia, "Veh. Technol.," *IEEE Trans*, p. 55/6, 2006.
- [14] Trzynadlowsky Andrzej M, *Control of Induction Motors*. department of electrical engineering university of Nevada, 2001.
- [15] Emmanuel Agung Nugroho, "IMPLEMENTASI INVERTER SEBAGAI PENGENDALI MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM)," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 7, no. 2, pp. 2252-4983, November 2016.