

Simulasi Mesin Induksi Tanpa Sensor Kecepatan Menggunakan Pengendali Orientasi Vektor

Feri Yusivar¹, Nanda Avianto Wicaksono²

Abstract— This research is intended to develop a speed sensorless induction machine model of wind turbine applications using vector orientation control method. This research is expected to use the results of previous research in induction motor applications, such as the development of adaptive vector control of sensorless induction motor for estimating the actual speed. The system in this paper consists of a wind turbine mechanical model, an induction machine model, and a vector orientation controller. The system is developed in S-Function C-MEX programs, and simulated using the MATLAB/Simulink. The system is tested in the condition that the wind speed and the reference rotor speed varies as step function. The results of the simulation show that the vector orientation controller is able to maintain the actual speed according to its reference, and the observer is able to estimate the actual rotor speed.

Intisari— Dalam paper ini dibangun model mesin induksi tanpa sensor kecepatan pada aplikasi PLT Bayu menggunakan metode pengendali berbasis orientasi vektor. Paper ini diharapkan dapat memanfaatkan hasil penelitian sebelumnya pada aplikasi motor induksi, seperti pengembangan kendali vektor adaptif pada motor induksi tanpa sensor untuk mengestimasi kecepatan putar. Sistem yang dikembangkan tersusun atas model mekanik turbin angin, model mesin induksi, dan pengendali berbasis orientasi vektor. Sistem tersebut ditulis dalam bentuk S-Function C-MEX dan disimulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Sistem diuji dalam kondisi di mana referensi kecepatan putar rotor dan kecepatan angin diberikan berubah dalam bentuk fungsi step. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali berbasis orientasi vektor yang digunakan telah berhasil menjaga aktual kecepatan putar rotor sesuai dengan nilai referensi yang diharapkan, dan observer yang dirancang mampu menghasilkan nilai estimasi kecepatan putar rotor yang dapat mengikuti perubahan kecepatan aktual.

Kata Kunci— *speed sensorless induction machine, wind turbine, RFOC, observer*

I. PENDAHULUAN

Pada aplikasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLT Bayu), terdapat tiga jenis generator yang umum digunakan, yaitu generator induksi, *permanent magnet synchronous generator*

¹Pengajar, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Jakarta INDONESIA (telp: 021- 7270078; fax: 021 – 7270077; e-mail: yusivar@yahoo.com)

²Mahasiswa, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Jakarta INDONESIA (telp: 021- 7270078; fax: 021 – 7270077; e-mail: nandaavianto@gmail.com)

(PMSG), dan *double-fed induction generator* (DFIG). Secara fisik, generator induksi yang digunakan pada PLT Bayu sama dengan motor induksi yang digunakan pada aplikasi sistem penggerak sehingga beberapa keunggulan yang dimiliki motor induksi juga dimiliki generator induksi. Dibandingkan dengan jenis-jenis motor lain, motor induksi memiliki banyak kelebihan, seperti konstruksi yang sederhana, dimensi fisik yang lebih kecil, kebutuhan pemeliharaan yang lebih sedikit dan sederhana, kehandalan dalam operasi yang tinggi, ketersediaan yang luas di pasaran, dan harga yang relatif lebih murah [1].

Pada aplikasi sistem penggerak atau motor, banyak penelitian yang telah dilakukan, di antaranya pengembangan model kendali vektor motor induksi [2][3] dan simulasinya [4]-[7], pengembangan dan simulasi sistem kendali vektor motor induksi dengan menggunakan PI dan fuzzy *controller* [8], pengembangan dan simulasi kendali adaptif vektor kontrol motor induksi untuk mengestimasi kecepatan putar [9]-[11], simulasi *pulse width modulation* (PWM) 3 fase *controller* pada kendali orientasi fluks [12], implementasi kontrol vektor menggunakan DSP [13] dan FPGA [14], serta eksperimen kontrol vektor pada aplikasi motor induksi [15].

Pada aplikasi pembangkitan listrik yang menggunakan generator induksi, penelitian yang telah dilakukan antara lain simulasi kendali orientasi fluks generator induksi [16]-[18], simulasi *observer* fluks generator induksi [19], dan simulasi generator induksi eksitasi sendiri dengan cara mengatur PWM pada *inverter* [20].

Khusus untuk aplikasi PLT Bayu dengan mesin/generator induksi, penelitian yang telah dilakukan adalah simulasi model *transient* yang mencakup mekanisme mekanik turbin angin, generator induksi rotor sangkar, *inverter* sisi generator, *dc-link*, *inverter* sisi jaringan, hingga daya listrik yang dapat dibangkitkan [21],[22]. Kedua simulasi tersebut menganggap generator induksi rotor sangkar, *inverter* sisi generator, *dc-link*, dan *inverter* sisi jaringan dalam satu kesatuan model, bukan sebagai satu sistem yang tersusun atas beberapa komponen.

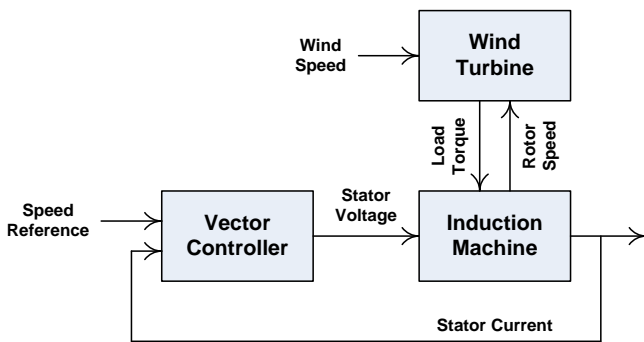
Berdasarkan hasil-hasil penelitian tersebut, terbuka kemungkinan pemanfaatan hasil penelitian pada aplikasi motor induksi seperti pengembangan kendali adaptif vektor kontrol pada motor induksi tanpa sensor pada aplikasi PLT Bayu, sehingga dapat meningkatkan kemampuan kendali PLT Bayu berbasis mesin induksi.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, paper ini disusun dengan tujuan untuk membangun model dan mensimulasikan mesin induksi tanpa sensor kecepatan dengan menggunakan metode pengendali orientasi vektor pada aplikasi PLT Bayu.

II. MODEL PLT BAYU

A. Sistem PLT Bayu Keseluruhan

Secara umum, sistem dibagi menjadi tiga bagian, yaitu turbin angin/wind turbine, mesin induksi, dan pengendali/controller, seperti dapat dilihat pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Diagram blok model turbin angin beserta mesin induksi dan pengendali vektornya.

Bagian pertama, turbin angin, digunakan untuk menghitung torsi beban/load torque berdasarkan kecepatan putar rotor/rotor speed yang dikeluarkan mesin induksi dan kecepatan angin yang disimulasikan. Output torsi beban tersebut menjadi input bagi mesin induksi.

Kedua, bagian mesin induksi digunakan untuk menghasilkan respon mesin induksi. Input mesin induksi ini adalah tegangan stator/stator voltage yang dihasilkan oleh pengendali/controller dan torsi beban yang diterima dari turbin angin. Output mesin induksi ini hanya arus stator/stator current.

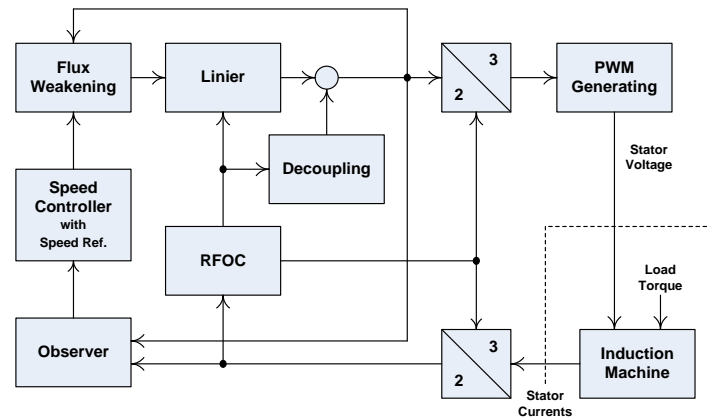
Bagian ketiga, controller, disusun atas beberapa bagian yaitu: transformasi dari tiga fase (abc) menjadi dua fase (dq) dan sebaliknya; pengendalian pengendali orientasi fluks rotor/rotor flux orientation control (RFOC); observer untuk menghasilkan estimasi kecepatan putar rotor; pengendali arus dan decoupling; flux weakening; pengendali kecepatan putar rotor/speed controller; serta pembangkit sinyal pulse width modulation atau PWM generating. Diagram blok bagian pengendali ini dapat dilihat pada Gbr. 2.

B. Turbin Angin

Pada paper ini, turbin angin yang dimodelkan adalah tipe horizontal axis dengan bilah-bilah terpasang pada poros turbin yang berkecepatan rendah/low speed shaft. Poros ini tidak terhubung langsung dengan rotor mesin induksi, melainkan melalui gearbox.

Submodel turbin angin ini menggunakan enam persamaan matematika. Persamaan (1) digunakan untuk menghitung capacity factor (C_p) dari turbin. Persamaan ini menggunakan tip ratio (λ) dan sudut serang/pitch i, sesuai dengan (3) dan (4). Tip ratio merupakan perbandingan kecepatan pada ujung bilah terhadap kecepatan angin, sedangkan sudut serang adalah kedudukan hadap bilah terhadap arah angin. Untuk menghitung tip ratio dibutuhkan kecepatan putar poros turbin (ω_{wt}) dengan cara membagi kecepatan putar rotor mesin

induksi aktual (ω_r) dengan konstanta perbandingan gearbox, sesuai (2) [21],[22].



Gbr. 2 Diagram blok pengendali vektor untuk mesin induksi.

$$C_p(\lambda, i) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4i - 5 \right) \exp \left(\frac{-12.5}{\lambda_i} \right) \quad (1)$$

$$\omega_{wt} = \frac{\omega_r}{K_G} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{r \omega_{wt}}{V} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08i} - \frac{0.035}{i^3 + 1} \quad (4)$$

Capacity factor (C_p) tersebut digunakan untuk menghitung daya/power yang dapat diterima turbin (P_{wt}) dan diteruskan ke poros turbin dengan mengikuti (5).

$$P_{wt} = 0.5 \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (5)$$

Selanjutnya, daya/power yang dapat diterima turbin (P_{wt}) tersebut digunakan untuk menghitung torsi beban/load torque yang diterima mesin induksi dengan mengikuti (6).

$$T_r = \frac{P_{wt}}{\omega_r} \quad (6)$$

C. Mesin Induksi

Submodel mesin induksi yang digunakan adalah model dalam kerangka acuan rotor dua fase (sumbu dq) sebagai fungsi diferensial dari arus stator sumbu d (i_{sd}) (7), arus stator sumbu q (i_{sq}) (8), arus rotor sumbu d (i_{rd}) (9), arus rotor sumbu q (i_{rq}) (10), sudut vektor tegangan stator (θ_e) (11), kecepatan putar rotor (ω_r) (12), dan sudut vektor tegangan stator (13) [23].

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} v_{sd} - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} \right) i_{sd} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} i_{rd} + \frac{(1-\sigma) N_p \omega_r}{\sigma} i_{rq} + \omega_e i_{sq} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} v_{sq} - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} \right) i_{sq} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma \tau_r} i_{rq} - \frac{(1-\sigma) N_p \omega_r}{\sigma} i_{rd} - \omega_e i_{sd} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}i_{rd} = -\frac{R_r}{L_r}i_{rd} + \frac{R_r}{L_r}i_{sd} + (\omega_e - N_p\omega_r)i_{rq} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}i_{rq} = -\frac{R_r}{L_r}i_{rq} + \frac{R_r}{L_r}i_{sq} - (\omega_e - N_p\omega_r)i_{rd} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_e = N_p\omega_r + \frac{i_{sq}}{\tau_r i_{mr}} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - T_L - B\omega_r) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \quad (13)$$

Sebelum menjalankan fungsi submodel ini, dilakukan transformasi terhadap tegangan stator yang diterima dari submodel *PWM generating*. Transformasi dilakukan untuk mengubah kerangka acuan stator tiga fase (sumbu abc) menjadi kerangka acuan stator dua fase (sumbu dq).

Setelah menjalankan fungsi submodel ini, selanjutnya dilakukan transformasi terhadap arus stator yang menjadi keluaran mesin induksi. Transformasi dilakukan untuk mengubah kerangka acuan stator dua fase (sumbu dq) kembali menjadi kerangka acuan stator tiga fase (sumbu abc).

D. Transformasi dari Tiga Fase menjadi Dua Fase dan Sebaliknya

Untuk mengubah kerangka acuan dari tiga fase (sumbu abc) menjadi rotor dua fase (sumbu dq), digunakan transformasi Clarke (14), dan lalu transformasi Park (15) [24].

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & 0.5\sqrt{3} & -0.5\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sebaliknya, untuk mengubah kerangka acuan dari dua fase (sumbu dq) menjadi rotor tiga fase (sumbu abc), digunakan invers transformasi Park (16), kemudian invers transformasi Clarke (17).

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & 0.5\sqrt{3} \\ -0.5 & -0.5\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Pada paper ini, transformasi dari tiga fase menjadi dua fase dan sebaliknya ini tidak hanya digunakan pada submodel mesin induksi, melainkan digunakan juga pada submodel *controller*.

E. RFOC

Submodel RFOC ini digunakan untuk menghitung estimasi kecepatan putar stator (ω_e), sudut vektor tegangan stator (θ_e), torsi elektrik (T_e), dan arus magnetisasi (i_{mr}) berdasarkan arus stator sumbu d dan q yang diterima dari mesin induksi. Berikut persamaan-persamaan yang digunakan pada submodel RFOC [24].

$$T_e = N_p(1 - \sigma)L_s i_{sq} i_{mr} \quad (18)$$

$$\omega_e = N_p\omega_r + \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{sq}}{i_{mr}} \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt}i_{mr} = \frac{1}{\tau_r}i_{sq} - \frac{1}{\tau_r}i_{mr} \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_e = \omega_e \quad (21)$$

F. Flux Weakening

Flux weakening merupakan metode pembatasan arus dan tegangan stator yang diberikan pada mesin induksi. Pembatasan tersebut bertujuan untuk mengurangi torsi yang terjadi ketika mesin induksi berputar melebihi batas kecepatan putarnya. Cara yang digunakan adalah dengan mengurangi fluks yang terjadi pada rotor. Persamaan-persamaan yang digunakan pada submodel *flux weakening* adalah (22) sampai dengan (26) [24].

$$e_{v2} = v_{smax}^2 - (v_{sd}^2 + v_{sq}^2) \quad (22)$$

$$i_{sdref} = K_{pimr}e_{v2} + K_{imr} \int e_{v2} dt \quad (23)$$

$$i_{sdref} \leq i_{mrmax} \quad (24)$$

$$i_{isqmax} = \sqrt{i_{smax}^2 - i_{sdref}^2} \quad (25)$$

$$|i_{sqref}| \leq |i_{isqmax}| \quad (26)$$

G. Pengendali Arus dan Decoupling

Referensi tegangan yang diberikan kepada stator v_{sd} dan v_{sq} merupakan gabungan antara referensi tegangan linier dan nonlinier (*decoupling*) seperti pada (27) dan (28).

$$v_{sd} = u_{sdlin} + u_{sddec} \quad (27)$$

$$v_{sq} = u_{sqlin} + u_{sqdec} \quad (28)$$

Referensi tegangan linier ditentukan oleh pengendali PI berdasarkan *error* antara referensi arus stator dengan nilai aktualnya, seperti yang ditunjukkan pada (29) dan (30).

$$u_{sdlin} = K_{pid}(i_{sdref} - i_{sd}) + K_{iid} \int (i_{sdref} - i_{sd}) dt \quad (29)$$

$$u_{sqlin} = K_{piq}(i_{sqref} - i_{sq}) + K_{iiq} \int (i_{sqref} - i_{sq}) dt \quad (30)$$

Pengendali PI tersebut hanya dapat mengendalikan sistem linier sedangkan mesin induksi sendiri adalah sistem nonlinier, sehingga harus dilinierasi dengan *decoupling* seperti yang ditunjukkan pada (31) dan (32).

$$u_{sddec} = -\omega_e L_s \sigma i_{sq} + L_s(1 - \sigma) \frac{d}{dt} i_{mr} \quad (31)$$

$$u_{sqdec} = \omega_e L_s \sigma i_{sd} + L_s(1 - \sigma) \omega_e i_{mr} \quad (32)$$

H. Pengendali Kecepatan

Pengendali kecepatan putar rotor yang digunakan adalah jenis pengendali PI. Pengendali kecepatan tersebut mengatur referensi arus stator pada sumbu q berdasarkan *error* antara referensi kecepatan putar yang diharapkan dengan nilai aktualnya, sesuai dengan (33) [24].

$$i_{sqref} = K_p\omega(\omega_{rref} - \omega_{rest}) + K_i\int(\omega_{rref} - \omega_{rest})dt \quad (33)$$

I. Observer

Seperti pembahasan sebelumnya, pengendali kecepatan putaran rotor memerlukan nilai kecepatan putar rotor aktual. Nilai aktual tersebut tidak dapat diambil dari mesin induksi karena mesin induksi yang digunakan tidak dilengkapi dengan sensor kecepatan putar rotor atau *sensorless induction machine*. Sinyal umpan balik yang diterima dari mesin induksi hanya berupa arus stator.

Untuk menggantikan nilai aktual tersebut, perlu diestimasi kecepatan putar rotor menggunakan (34). Estimasi kecepatan putar rotor tersebut dihitung berdasarkan estimasi fluks rotor ($\Psi_{rdest}, \Psi_{rquest}$) dan *error* antara estimasi arus stator dan nilai aktual arus stator (e_{isd}, e_{isq}).

$$\omega_{rest} = K_p(\psi_{rquest} e_{isd} - \psi_{rdest} e_{isq}) + K_i\int(\psi_{rquest} e_{isd} - \psi_{rdest} e_{isq})dt \quad (34)$$

Untuk mendapatkan nilai estimasi fluks rotor ($\Psi_{rdest}, \Psi_{rquest}$) dan arus stator (i_{sdest}, i_{squest}), diperlukan *observer*. Pada paper ini, *observer* yang digunakan adalah *observer* Luenberger. *Observer* Luenberger dapat mengestimasi *state variables* (\mathbf{X}) dan *output variables* (\mathbf{Y}) dari sebuah sistem yang memiliki *state space* (34) dan (35).

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (35)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (36)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma\tau_r}\right) & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} & \frac{L_m N_p \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_e & \frac{1}{\sigma L_s}\left(-R_s - \frac{L_m^2}{\tau_r L_r}\right) & -\frac{L_m N_p \omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s \tau_r L_r} \\ \frac{R_r}{L_r} L_m & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & (\omega_e - N_p \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{\tau_r} & -(\omega_e - N_p \omega_r) & \frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{sdest} \\ i_{squest} \\ \psi_{rdest} \\ \psi_{rquest} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma\tau_r}\right) & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} & \frac{L_m N_p \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_e & \frac{1}{\sigma L_s}\left(-R_s - \frac{L_m^2}{\tau_r L_r}\right) & -\frac{L_m N_p \omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s \tau_r L_r} \\ \frac{R_r}{L_r} L_m & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & (\omega_e - N_p \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{\tau_r} & -(\omega_e - N_p \omega_r) & \frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdest} \\ i_{squest} \\ \psi_{rdest} \\ \psi_{rquest} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & -g_1 \\ g_3 & -g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} - i_{sdest} \\ i_{sq} - i_{squest} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sdest} \\ i_{squest} \\ \psi_{rdest} \\ \psi_{rquest} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdest} \\ i_{squest} \\ \psi_{rdest} \\ \psi_{rquest} \end{bmatrix}$$

Nilai estimasi *state variable* (\mathbf{X}_{est}) dan *output variable* (\mathbf{Y}_{est}) tersebut dihitung menggunakan (37) dan (38).

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X}_{est} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{est} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{est}) \quad (37)$$

$$\mathbf{Y}_{est} = \mathbf{C}\mathbf{X}_{est} \quad (38)$$

Pada sistem mesin induksi, digunakan *observer* Luenberger pada (40) untuk mengestimasi *state variables* arus stator (i_{sd}, i_{sq}) dan fluks rotor (Ψ_{rd}, Ψ_{rq}) dan pada (39). *State variables* estimasi tersebut adalah $i_{sdest}, i_{squest}, \Psi_{rdest},$ dan Ψ_{rquest} . Persamaan *observer* tersebut menggunakan nilai *gains* $g_1, g_2, g_3,$ dan g_4 mengikuti (41) sampai dengan (44) [25].

$$g_1 = \frac{(k-1)}{k}\left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) \quad (41)$$

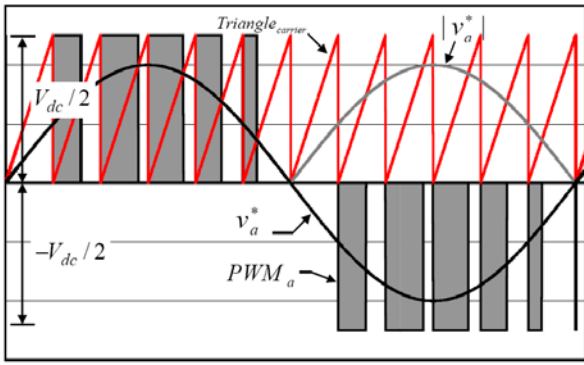
$$g_2 = -\frac{(k-1)}{k}N_p\omega_r \quad (42)$$

$$g_3 = \frac{(k-1)}{k(\tau_r^2 N_p^2 \omega_{rest}^2 + 1)}\left(\frac{R_s R_r \tau_r + L_s R_r - \sigma \tau_r L_s L_r N_p^2 \omega_{rest}^2}{L_m}\right) \quad (43)$$

$$g_4 = \frac{(k-1)}{k(\tau_r^2 N_p^2 \omega_{rest}^2 + 1)}\left(\frac{(R_s L_r \tau_r + R_r L_s \tau_r - \sigma L_s L_r) N_p \omega_{rest}}{L_m}\right) \quad (44)$$

J. Pembangkitan Sinyal PWM

Pembangkitan sinyal PWM dilakukan dengan cara membandingkan nilai mutlak referensi tegangan setiap fase dengan segitiga pembawa/*triangle carrier*. Jika nilai mutlak referensi lebih besar maka kondisi *switching* diatur menjadi *on*.



Gbr. 3 Mekanisme pembangkitan sinyal PWM.

III. IMPLEMENTASI

Sistem PLT Bayu ini tersusun atas blok-blok submodel yang ditulis dalam bentuk S-Function C-MEX dan disimulasi menggunakan MATLAB/Simulink seperti pada Gbr. 4. Parameter-parameter turbin angin dan mesin yang digunakan tercantum pada Tabel I.

Sistem diuji dengan dua skenario. Pertama, kondisi awal referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}), aktual kecepatan putar rotor (ω_r), dan kecepatan angin (V) masing-masing adalah 120 rad/s, 0 rad/s, dan 4 m/s. Kemudian referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) diubah menjadi 200 rad/s pada detik ke-6. Selanjutnya, kecepatan angin (V) diubah menjadi 10 m/s pada detik ke-10.

Sedangkan pada skenario kedua, kondisi awal referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}), aktual kecepatan putar rotor (ω_r), dan kecepatan angin (V) ditentukan masing-masing adalah 200 rad/s, 0 rad/s, dan 10 m/s. Kemudian referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) diubah menjadi 260 rad/s pada detik ke-6. Selanjutnya, kecepatan angin (V) diubah menjadi 25 m/s pada detik ke-10.

IV. HASIL SIMULASI

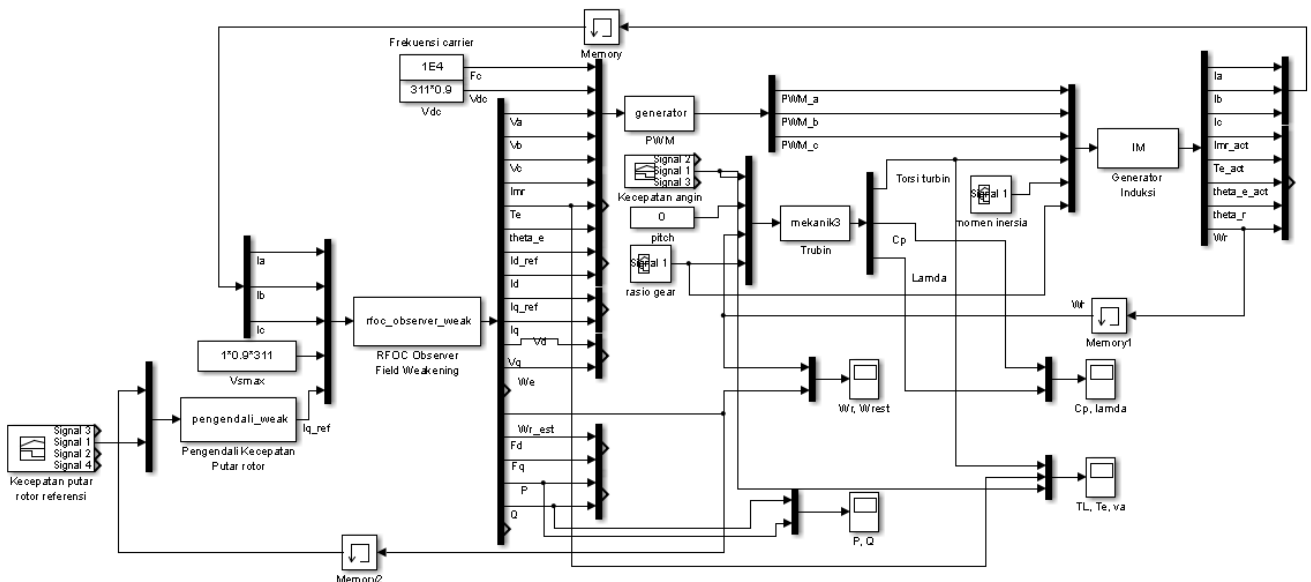
Pada Gbr. 5 ditunjukkan respon aktual arus stator hasil pengendali vektor. Pada pengujian menggunakan skenario pertama, respons model mekanik turbin telah menunjukkan fungsi yang diharapkan. Perubahan kecepatan angin (V) (garis ungu) dari 4 m/s menjadi 10 ms/s pada detik ke-6 telah berhasil direspons dengan penurunan tip rasio (λ) (garis hijau), capacity factor (C_p) (garis merah), nilai mutlak torsi beban (TL) (garis biru) (lihat Gbr. 6).

TABEL I
PARAMETER MESIN INDUKSI DAN TUBIN ANGIN

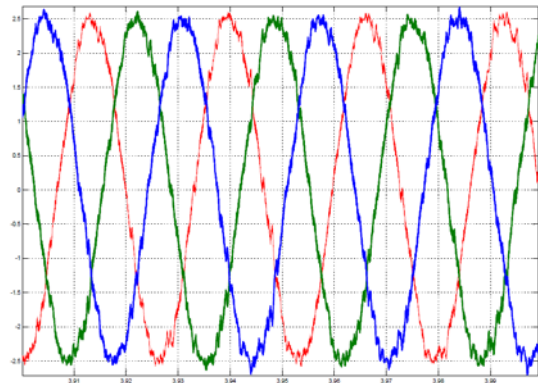
Simbol	Deskripsi	Nilai	Satuan
N_p	Jumlah pole	2	-
R	Jari-jari bilah	0.95	m
K_G	Rasio gearbox	6.65	-
R_r	Resistansi rotor	2.9	Ω
R_s	Resistansi stator	2.75	Ω
L_s	Induktansi stator	234.9	mH
L_r	Induktansi rotor	234.9	mH
L_m	Induktansi mutual	227.9	mH

Pada Gbr. 6 juga ditunjukkan bahwa kenaikan referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10 telah berhasil direspons dengan menaikkan tip rasio (λ) (garis hijau), capacity factor (C_p) (garis merah), dan nilai mutlak torsi beban (TL) (garis biru). Perubahan referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) tersebut ditunjukkan pada Gbr. 7.

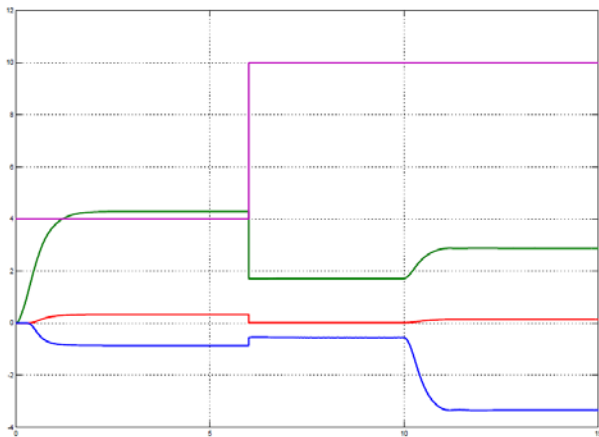
Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa RFOC berhasil menjaga aktual kecepatan putar rotor sesuai dengan nilai referensi meskipun diberi perubahan kecepatan angin. Perubahan kecepatan angin (V) dari 4 m/s menjadi 10 ms/s pada detik ke-6 juga berhasil direspons dengan aktual kecepatan putar rotor tetap berada di sekitar 120 rad/s, seperti pada Gbr. 7.



Gbr. 4 Implementasi PLT Bayu dengan menggunakan S-Function C-MEX dan Simulink MATLAB.

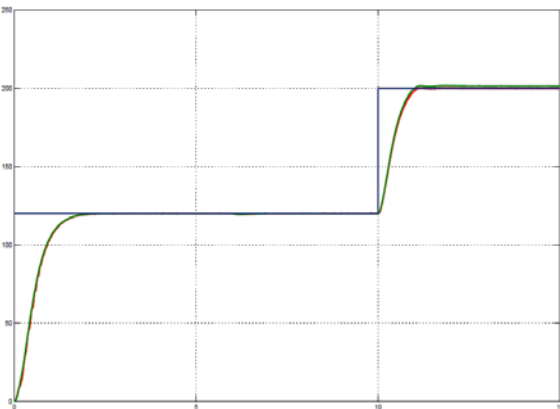


Gbr. 5 Respons arus stator hasil kendali vektor fluks mesin induksi.



Gbr. 6 Respons *capacity factor* (c_p) (merah), *tip ratio* (λ) (hijau), torsi beban (TL), terhadap perubahan kecepatan angin (V) (ungu) dari 4 m/s menjadi 10 m/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10.

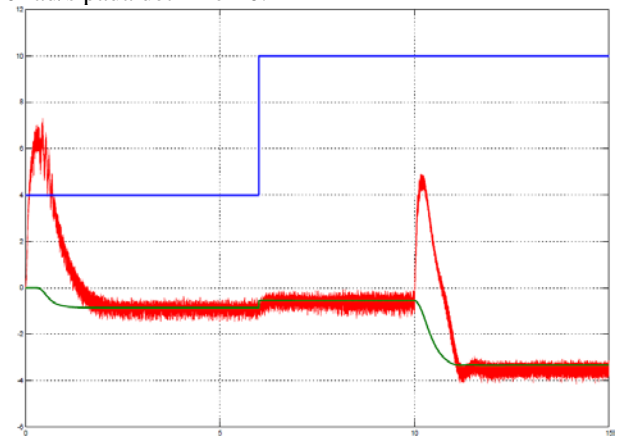
Pada Gbr. 7 juga ditunjukkan estimasi kecepatan putar rotor (garis merah) yang dihasilkan *observer* dapat mengikuti perubahan kecepatan aktual (garis hijau).



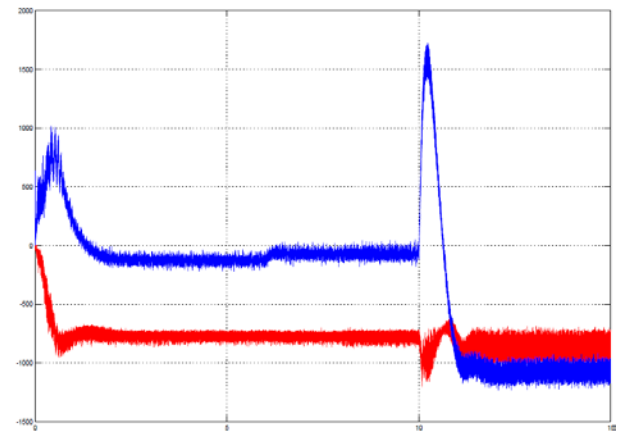
Gbr. 7 Respons estimasi kecepatan putar rotor (ω_{rest}) (merah) dan kecepatan putar rotor aktual (ω_r) (hijau) terhadap perubahan kecepatan angin (V) dari 4 m/s menjadi 10 m/s pada detik ke-6 dan referenesi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) (biru) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10.

Pada Gbr. 8 dan Gbr. 9 ditunjukkan pola torsi beban (TL) (garis hijau) yang diikuti torsi elektrik (Te) (garis merah) dan

pola respons daya aktif yang sama dengan pola respons torsi elektrik ketika sistem mengalami perubahan kecepatan angin (V) (biru) dari 4 m/s menjadi 10 m/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10.



Gbr. 8 Respons torsi elektrik (T_e) (merah), torsi beban (TL) (hijau), terhadap perubahan kecepatan angin (V) (biru) dari 4 m/s menjadi 10 m/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10.

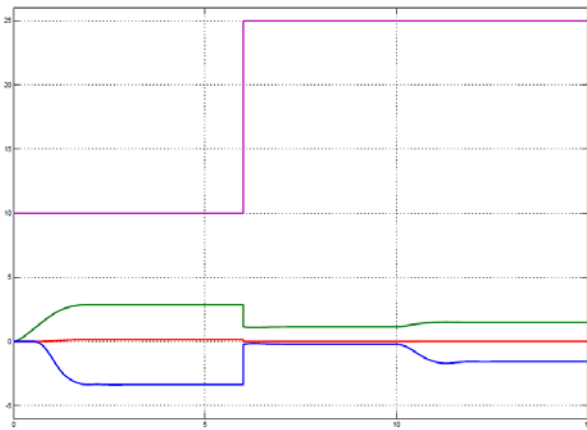


Gbr. 9 Respons daya aktif (P) (biru), daya reaktif (Q) (merah) terhadap perubahan kecepatan angin (V) dari 4 m/s menjadi 10 m/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 120 rad/s menjadi 200 rad/s pada detik ke-10.

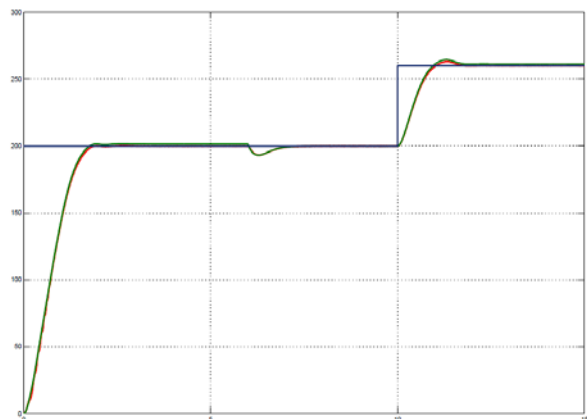
Ketika diuji dengan skenario kedua, model mekanik turbin dapat merespons perubahan kecepatan angin (V) (garis ungu) dari 10 m/s menjadi 25 m/s pada detik ke-6 dengan menurunkan tip rasio (λ) (garis hijau), *capacity factor* (C_p) (garis merah), nilai mutlak torsi beban (TL) (garis biru) seperti pada Gbr. 10.

Pada Gbr. 10 juga ditunjukkan bahwa kenaikan referensi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10 telah berhasil direspons dengan menaikkan tip rasio (λ) (garis hijau), *capacity factor* (C_p) (garis merah), nilai mutlak torsi beban (TL) (garis biru).

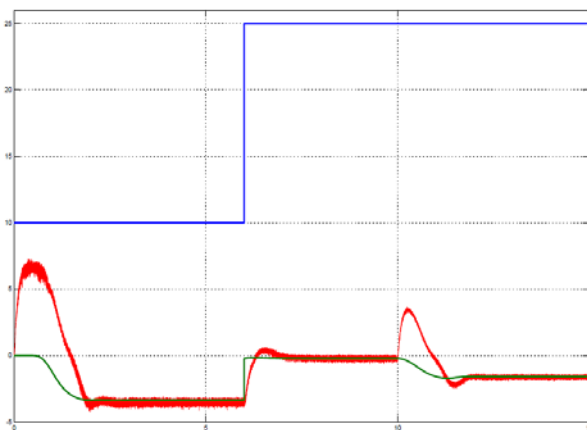
Pada Gbr. 11 ditunjukkan RFOC berhasil menjaga aktual kecepatan putar rotor tetap berada di sekitar 200 rad/s meski terjadi perubahan kecepatan angin (V) dari 10 m/s menjadi 25 m/s pada detik ke-6, seperti pada Gbr. 7.



Gbr. 10 Respons *capacity factor* (cp) (merah), tip rasio (λ) (hijau), torsi beban (TL), terhadap perubahan kecepatan angin (V) (ungu) dari 10 m/s menjadi 25 ms/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10.

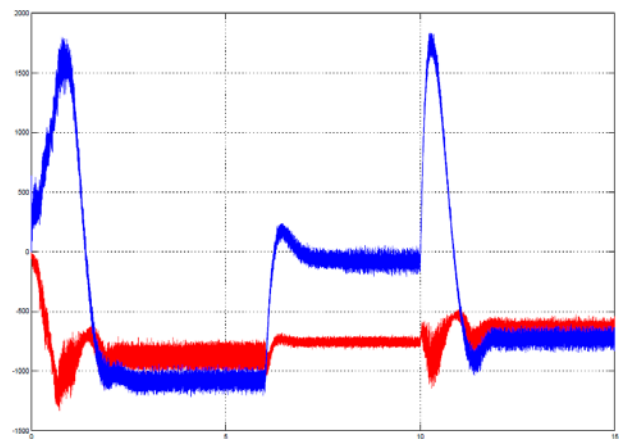


Gbr. 11 Respons estimasi kecepatan putar rotor (ω_{rest}) (merah) dan kecepatan putar rotor aktual (ω_r) (hijau) terhadap perubahan kecepatan angin (V) dari 10 m/s menjadi 25 ms/s pada detik ke-6 dan referenesi kecepatan putar rotor (ω_{ref}) (biru) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10.



Gbr. 12 Respons torsi elektrik (T_e) (merah), torsi beban (TL) (hijau), terhadap perubahan kecepatan angin (V) (biru) dari 10 m/s menjadi 25 ms/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10.

Pada Gbr. 11 tersebut juga ditunjukkan bahwa estimasi kecepatan putar rotor (garis merah) yang dihasilkan *observer* dapat mengikuti perubahan kecepatan aktual (garis hijau).



Gbr. 13 Respons daya aktif (P) (biru), daya reaktif (Q) (merah) terhadap perubahan kecepatan angin (V) dari 10 m/s menjadi 25 ms/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10.

Pada Gbr. 12 dan Gbr. 13 ditunjukkan pola torsi beban (TL) (garis hijau) yang diikuti torsi elektrik (T_e) (garis merah) dan pola respons daya aktif yang sama dengan pola respons torsi elektrik ketika sistem mengalami perubahan kecepatan angin (V) (biru) dari 10 m/s menjadi 25 ms/s pada detik ke-6 dan referensi kecepatan putar rotor (ω_r) dari 200 rad/s menjadi 260 rad/s pada detik ke-10.

V. KESIMPULAN

Model mesin induksi tanpa sensor kecepatan dengan metode pengendali berbasis orientasi vektor pada aplikasi PLT Bayu yang dikembangkan tersusun atas mekanikal turbin angin, mesin induksi, dan sistem pengendali. Sistem pengendali yang digunakan tersebut disusun atas transformasi dari tiga fase (abc) menjadi dua fase (dq) dan sebaliknya, RFOC, *observer*, pengendali arus dan *decoupling*, *flux weakening*, pengendali kecepatan putar rotor, dan pembangkit sinyal PWM. Hasil simulasi menunjukkan RFOC yang digunakan telah berhasil menjaga aktual kecepatan putar rotor sesuai dengan nilai referensi yang dimasukkan meskipun terjadi perubahan kecepatan angin. Hasil simulasi juga menunjukkan *observer* mampu menghasilkan nilai estimasi kecepatan putar rotor yang mampu mengikuti perubahan kecepatan aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi serta Universitas Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui program Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi No. 0563/UN2.R12/HKP.05.00/2015.

REFERENSI

[1] T. Cao-Minh Ta, C. Chakraborty, Y. Hori, "Efficiency Maximization of Induction Motor Drives for Electric Vehicles Based on Actual Measurement of Input Power," on 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'01, 2001.

- [2] M. Popescu, "Induction Motor Modeling for Vector Control Purposes," M.Eng. thesis, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2000.
- [3] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," in *Proceeding of the IEEE*, vol. 90, no. 8, pp. 1359–1394, 2002.
- [4] M. Chebre, A. Meroufel, and Y. Bendaha, "Speed Control of Induction Motor Using Genetic Algorithm-based PI Controller Indirect Field-oriented Control of the IM," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 8, no. 6, pp. 141–153, 2011.
- [5] K. Ramesh, C.R. Kumar, and P.B. Murali, "Modeling and Implementation of Vector Control for Induction Motor Drive," *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, no. 2, pp. 80–91, 2015.
- [6] A.P. Antony and R. Sankaran, "Simulation of Performance of a Cage Induction Motor Driven Spooler Drive with Speed and Current Feedback using Field-Oriented Control," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 7797–7806, 2014.
- [7] S. Hasmumi, "The Development of Simulink Model of Vector Control of an Induction Machine," B.Eng. thesis, Universiti Teknikal Kebangsaan Malaysia, 2005.
- [8] C. Chengaiah, IS. Prasad, "Performance of Induction Motor Drive by Indirect Vector Controlled Method Using PI AND Fuzzy Controller," *International Journal of Science, Environment and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 457–469, 2013.
- [9] G. Pydiraju and M. Daivaasirvadam, "Sensorless Speed Control of Induction Motor Using MRAS," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 1, no. 5, pp. 31–35, 2012.
- [10] T. Raghu, J.S. Rao, and S.C. Sekhar, "Simulation of Sensorless Speed Control of Induction Motor Using APFO Technique," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 440–444, 2012.
- [11] G. Dong "Sensorless and Efficiency Optimized Induction Machine Control with Associated Converter PWM Modulation Schemes," Ph.D. thesis, Tennessee Technological University, 2005.
- [12] A.V. Peterchev "Digital Pulse-Width Modulation Control in Power Electronic Circuits: Theory and Applications," Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2006.
- [13] Q. Chen and L. Yuan, "Vector Control of an Induction Motor Based on a DSP," M.Sc. thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2011.
- [14] O. Akin and I. Alan, "The Use of FPGA in Field-Oriented Control of an Induction Machine," *The Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, no. 6, pp. 943–962, 2010.
- [15] A.M. Bazzi, "Designing Better Induction Motor Drive Systems form Efficiency, Reability, and Power Electronics Perpectives," Ph.D.thesis, University of Illionis, Urbana-Champaign, 2010.
- [16] S. Devabhaktuni and S.V.J. Kumar, "Stator Flux Oriented Vector Control of Wind Driven Self Excited Induction Generator Connected to Grid through Cycloconverter," *Innovative System Design and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 70–78, 2012.
- [17] A. Guettaf, A. Bettka, O. Bennis, F. Benchabane, K. Yahia, and A. Arif, "Direct Field Orientated Control of Induction Motor Fed by Wind Turbine Generator under Saturation Effect," *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, vol 7, no. 1, pp. 190-196, 2011.
- [18] J.L. Dominguez-Gracia, O. Gomis-Bellmunt, L. Trilla-Romero, and A. Junyent-Ferre, "Vector Control of Squirrel Cage Induction Generator for Wind Power," in *XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM*, 2010.
- [19] I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, and V. Cristian, "Above Flux Estimation Issues in Induction Generators with Application at Energy Conversion Systems," *Acta Poltechnica Hungarica*, vol. 3, no. 3, pp. 137–148, 2006.
- [20] H.S. Kamil and S.U. Kulkarni, "Overview of Wind Turbine Driven Self-Excited Induction Generator," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 2, no. 4, pp. 181–185, 2013.
- [21] G. Rogdakis, R. Gracia-Velle, I. Arana, "Transient Model Validation of Fixed-Speed Induction Generator Using Wind Farm Measurements," *IEEE Transaction on on Power Systems*, vol.27, no.1, pp. 564 - 571, 2011.
- [22] D. Gracia and J. Luis, "Modeling and Control of Squirrel Cage Induction Generator with Full Power Converter Applied to Windmills," M.Eng. thesis, University of Oulu, Oulun Yliopisto, 2009.
- [23] P.Vas, *Electric Machine and Drives: A Space Vector Theory Approach*, Oxford University, New York, 1992
- [24] F. Yusivar and S. Wakao, "Minimum Requirements of Motor Vector Control Modeling and Simulation Utilazing C MEX S-Function in Matlab/Simulink," in *Proc.the 4th IEEE International Conference on Power Electrnics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 315-32, 2001.
- [25] R.Gunawan, F. Yusivar, W.Wahab, and Z.A. Kadir, "Percangan Putaran Motor Induksi Tigas Fasa Tanpa Sensor Kecepatan dengan Pengendali Vektor Arus dan Full dan Reduced Observer Berada pada Sumbu dq," *Makara Teknologi*, vol. 10, no.1, pp.34-39, 2006.