

## PENGENDALIAN MOTOR BLDC MENGUNAKAN JARING SARAF TIRUAN

**Bambang Sujanarko**

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember

email: [bbsujanarko@yahoo.co.id](mailto:bbsujanarko@yahoo.co.id)

### Abstrak

Dalam penelitian ini dikembangkan suatu pengendalian motor BLDC menggunakan Jaring Saraf Tiruan (JST) atau Neural Network (NN). Penyusunan Jaring Saraf Tiruan atau Neural Network dilakukan dengan teknik pembelajaran berdasarkan algoritma backpropagation dan dengan optimasi struktur yang didasarkan pada epoch dan error yang minimal. Efektivitas metode yang diusulkan diverifikasi dengan membandingkan kinerja motor BLDC menggunakan kendali JST dengan kinerja motor BLDC yang menggunakan kendali PID. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol JST yang diusulkan mampu menghasilkan peningkatan kinerja kendali yang signifikan dibandingkan dengan kontroler PID. Pada kondisi pengendalian kecepatan referensi yang variasi, kecepatan yang dihasilkan kendali JST lebih cepat menyesuaikan dan lebih stabil bila dibandingkan dengan dengan kendali PID. Begitu juga pada beban yang bervariasi, kendali dengan JST menghasilkan kecepatan motor jauh lebih stabil dibandingkan dengan kontrol PID.

**Kata kunci:** kontrol; Brushless Direct Current; Jaring Saraf Tiruan; PID

### Pendahuluan

Pada abad ke-20, motor induksi sangkar tupai telah menjadi motor listrik paling populer, karena kesederhanaan konstruksinya. Kemajuan elektronika daya dan pemroses sinyal digital telah menambahkan lebih banyak fitur untuk pengemudian motor tersebut, sehingga motor ini sangat banyak dipakai di industri. Namun motor induksi sangkar tupai memiliki faktor daya dan efisiensi yang buruk dibandingkan untuk motor sinkron. Di sisi lain, motor sinkron dan motor dc dengan komutator/sikat memiliki keterbatasan seperti sebagai kecepatan, masalah kebisingan, keausan dan interferensi elektromagnetik. Masalah-masalah ini telah mendorong pengembangan motor sinkron atau motor DC tanpa sikat (brushless) menggunakan magnet permanen motor yang memiliki eksitasi permanen magnet pada rotor [1-3].

Motor tanpa sikat dan menggunakan magnet permanen tersebut pada dasarnya suatu bentuk motor tiga fase sinkron yang memiliki komutator elektronik yang tersinkronisasi dengan posisi rotor. Motor tersebut selanjutnya disebut motor DC tanpa sikat (Brushless DC) atau BLDC [1-8]. Popularitas motor BLDC meningkat dari hari ke hari, karena pada kenyataannya motor memiliki kepadatan energi yang tinggi, biaya pembuatan bahan magnet permanen seperti Samarium Cobalt (Sm-Co) dan Nd-Fe-B yang makin murah dan adanya kemajuan dalam inovasi desain [1]. Motor BLDC paling cocok untuk sistem yang membutuhkan pengontrolan posisi pada industri sampai ukuran menengah, karena sangat dinamis, kerugian yang kecil dan rasio torsi/ berat yang baik [1-3].

Pada saat ini beberapa motor BLDC telah diaplikasikan dalam mobil listrik dan mobil hibrida, karena pertimbangan emisi kendaraan yang mencemari lingkungan. Dalam aplikasi ini, masih terus diupayakan agar harga motor BLDC dapat ditekan, begitu pula untuk pengontrolnya, termasuk juga upaya untuk meningkatkan efisiensi [2-4]. Salah satu dari upaya tersebut adalah penggunaan kecerdasan buatan sebagai kontrol motor BLDC [5-8]. Dalam penelitian ini dikembangkan suatu pengendalian motor BLDC menggunakan Jaring Saraf Tiruan (JST) atau Neural Network (NN).

### Disain Sistem Pengendalian

Model keadaan ruang (*state space*) motor BLDC yang mengacu pada kerangka rotasi rotor adalah seperti persamaan (1), dengan  $i_d$  dan  $i_q$  adalah komponen *direct* dan *quadrature* dari arus stator,  $R$  adalah resistansi stator,  $L_q$  dan  $L_d$  adalah induktansi,  $\lambda$  adalah besar flux yang diakibatkan magnet permanen dan  $\omega$  adalah kecepatan rotor. Model tersebut didasarkan pada asumsi bahwa celah udara sama, arus yang dibangkitkan rotor diabaikan dan motor dicatu dengan tegangan sinusoida tiga fase [1,5]. Dengan pengendalian motor secara *vector control*, dalam motor terdapat komponen flux and torsi yang dapat dikendalikan secara terpisah. Dengan kedua komponen ini, torsi elektromagnetik

( $T_e$ ) pada motor BLDC adalah seperti persamaan (2). Jika motor dibuat dengan magnet permanen dipasang pada permukaan rotor, maka induksi pada sumbu d dapat diasumsikan sama dengan induksi pada sumbu q, sehingga torsi elektrik akan hanya tergantung pada arus sumbu q, seperti diperlihatkan pada persamaan (3). Model seperti ini memiliki persamaan dinamis mekanik pada (4), dengan  $\omega$  adalah kecepatan rotor elektrik,  $T_L$  adalah beban torsi (Nm), J dan B adalah momen inersia dan momen gesek pada motor.

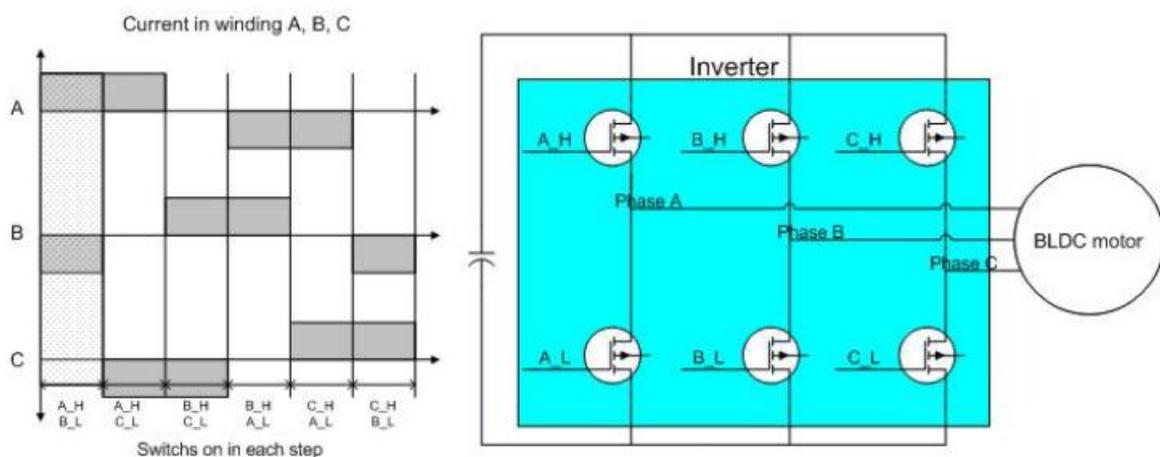
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{L_q} \omega - \frac{L_d}{L_q} \omega \cdot i_d \\ \frac{L_q}{L_d} \omega \cdot i_q \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\mathcal{F}_e = \frac{3P\lambda}{4} i_q + (L_d - L_q) i_q i_d \tag{2}$$

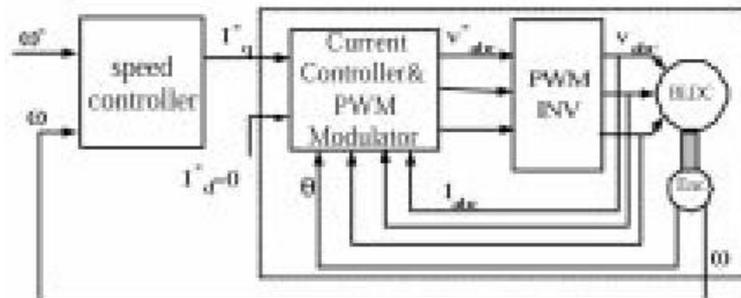
$$\mathcal{F}_e = \frac{3P\lambda}{4} i_q \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{3P^2 \lambda}{8J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{P}{2J} T_L \tag{4}$$

Untuk mendapatkan daya listrik sebagaimana pada pemodelan tersebut, umumnya motor BLDC menggunakan inverter tiga fase dengan bentuk gelombang dan rangkaian seperti tampak pada Gambar 1 [6]. Berdasarkan Gambar 1, pada interval pertama, fase A akan terhubung dengan DC positif dan fase B akan terhubung dengan DC negatif, sedang fase C tidak terhubung, yang berarti bahwa hanya dua saklar A\_H dan B\_L yang aktif, sedangkan sisanya, yaitu saklar A\_L, B\_H, C\_H, dan C\_L tidak aktif. Pada interval kedua, saklar yang aktif adalah A\_H dan C\_L, interval ketiga, saklar yang aktif B\_H dan C\_L, begitu seterusnya sampai dengan interval keenam dengan saklar yang aktif telah diperlihatkan pada Gambar 1. Pensaklaran seperti itu selanjutnya menjadi dasar bagi pengendalian *vector control* seperti tampak pada Gambar 2 [5], dengan modulator PWM, kontrol arus serta kontrol kecepatan ditambahkan sebagai elemen sistem pengendalian.

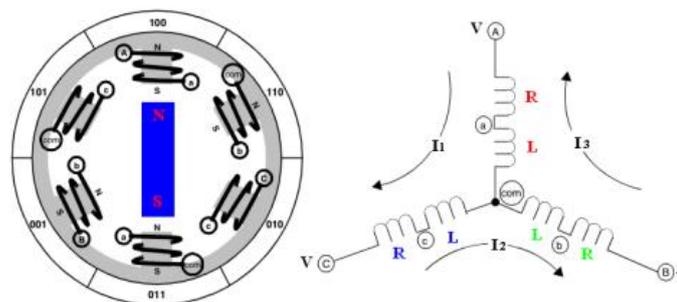


Gambar 1 Pensaklaran inverter pada BLDC



Gambar 2 Pengendalian *vector control* pada BLDC

Dalam penelitian ini, implementasi pengendalian akan diwujudkan dengan menggunakan deteksi posisi rotor yang berasal dari tegangan balik atau yang umum disebut dengan Back Electro Motif Force (BEMF). Salah satu bentuk BEMF tersebut adalah bentuk trapesium. Model matematika dari BEMF tersebut diperlihatkan pada persamaan (5) [8], dengan  $e_a$ ,  $e_b$  dan  $e_c$  adalah tegangan BEMF,  $k_e$  adalah konstanta BEMF,  $f_a(\theta)$ ,  $f_b(\theta)$ , dan  $f_c(\theta)$  adalah fungsi posisi rotor. Jika ditulis dalam formulasi lengkap, berdasarkan rangkaian ekuivalen seperti Gambar 3, motor BLDC memiliki persamaan (6), dengan  $v_a$ ,  $v_b$ , dan  $v_c$  adalah tegangan fase,  $R$  adalah resistansi kumparan,  $L$  adalah induktansi dan  $M$  adalah induktansi mutual.

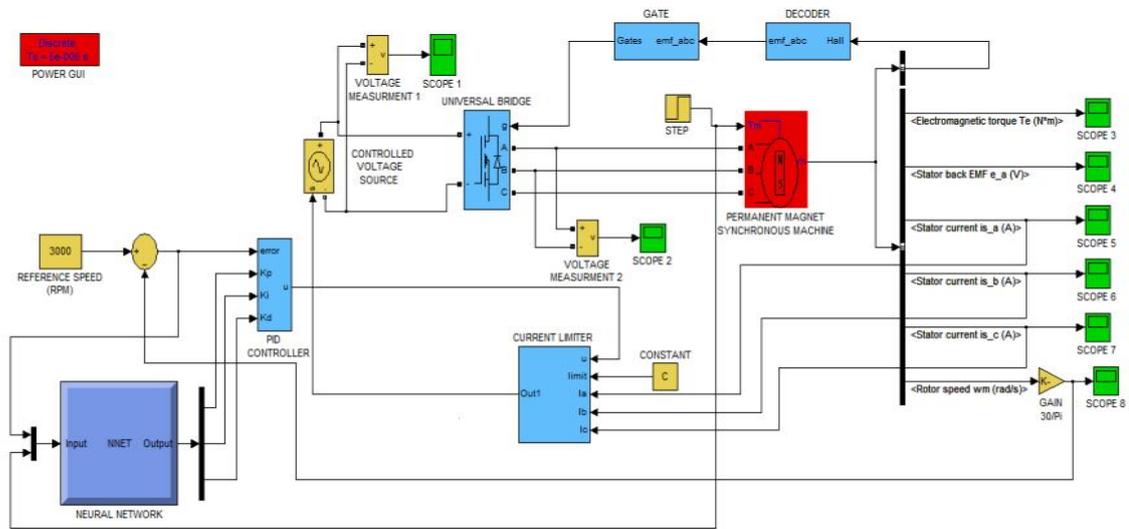


Gambar 3 Rangkaian ekuivalen motor BLDC

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} f_a(\theta) \\ f_b(\theta) \\ f_c(\theta) \end{bmatrix}, \quad (E = k_e \omega_r) \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L-M) & 0 & 0 \\ 0 & (L-M) & 0 \\ 0 & 0 & (L-M) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

Bersama-sama dengan parameter kontrol lain, posisi rotor tersebut kemudian akan digunakan sebagai masukan pengendalian menggunakan JST berbasis kontrol PID dan pengendalian PID dengan penalaan Ziegler-Nicholus. Rangkaian simulasi pengendalian menggunakan JST diperlihatkan pada Gambar 4 [9]. Dalam simulasi ini JST atau NN menggunakan arsitektur *Multi Layer Perceptron* (MLP), yang terdiri dari lapis masukan (*input layer*), lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan lapisan keluaran (*output layer*) [10]. Pada penelitian digunakan jumlah lapisan masukan sebanyak 2 neuron, lapisan tersembunyi sebanyak 10 neuron dan lapisan keluaran sebanyak 3 neuron. Nilai bobot dan bias pada masing-masing neuron dilatih dengan menggunakan NNTOOL pada program Matlab dengan algoritma *Levenberg-Marquardt* (TRAINLM) dan dengan adaptasi *Gradient descent with momentum* (LEARNGDM).

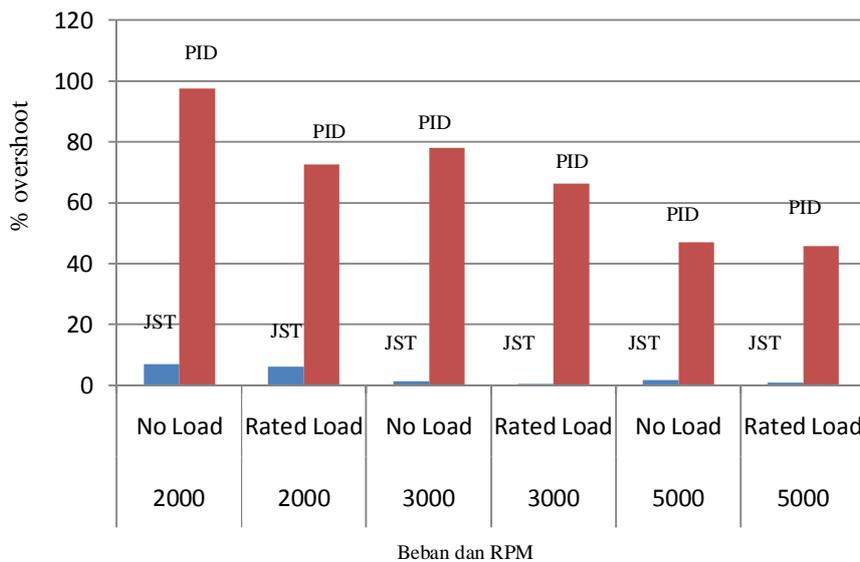


Gambar 4 Rangkaian Simulasi pengendalian motor BLDC dengan JST

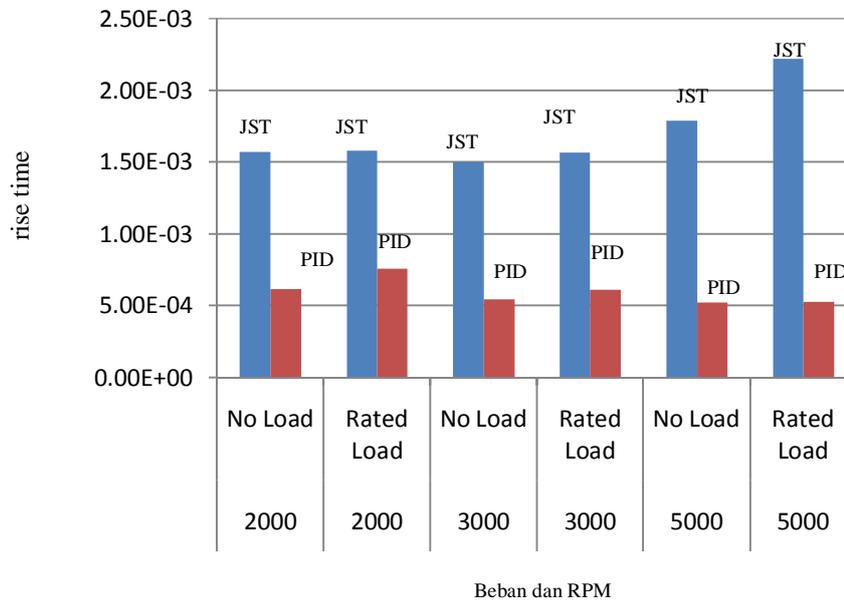
**Hasil dan Pembahasan**

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kecepatan konstan beban bertambah, pengendalian menggunakan JST memberikan respon transien yang lebih baik dibandingkan dengan pengendalian menggunakan PID dengan penalaan Ziegler-Nicholus. Pada kecepatan 2000 rpm misalnya, rpm pada pengendalian PID dapat memiliki nilai *overshoot* sampai 4000 rpm, sementara pada pengendalian dengan JST, *overshoot* tersebut hanya 2100 rpm. Pada kecepatan yang lebih tinggi, *overshoot* akan berkurang. Pada simulasi, didapatkan pula adanya fenomena *overshoot* yang paling kecil ketika beban yang dipasang mendekati nilai *rating*-nya.

Gambar 5 memperlihatkan perbandingan presentase *overshoot* pada pengendalian menggunakan JST dan pengendalian menggunakan PID. *Rise time* pada pengendalian dengan JST secara umum akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan pengendalian menggunakan PID. Gambar 6 memperlihatkan perbandingan *rise time* tersebut.



Gambar 5 Perbandingan % overshoot [9]



Gambar 6 Perbandingan *rise time* [9]

Perbandingan kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa pengendalian menggunakan JST pada motor BLDC menghasilkan performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaan kontrol konvensional, yaitu kontrol PID. Hal tersebut karena % *overshoot* kecepatan motor pada pengendalian dengan JST memiliki nilai yang jauh lebih rendah, artinya rpm yang dihasilkan motor lebih stabil dengan *overshoot* yang tidak lebih dari 10%. Sedangkan untuk parameter *rise time*, pengendalian dengan JST akan memberikan waktu yang sedikit lebih lama dibanding dengan pengendalian dengan PID.

**Kesimpulan**

Dari pengujian menggunakan simulasi berbasis Matlab dapat disimpulkan bahwa oengendalian motor BLDC menggunakan JST dapat menghasilkan peningkatan kinerja kendali yang signifikan dibandingkan dengan kontroler PID. Pada kondisi pengendalian kecepatan referensi yang variasi, kecepatan yang dihasilkan kendali JST lebih cepat menyesuaikan dan lebih stabil bila dibandingkan dengan dengan kendali PID, yang ditunjukkan dengan nilai *overshoot* yang lebih rendah dan nilai *rise time* yang cukup. Begitu juga pada beban yang bervariasi, pengendalian dengan JST juga menghasilkan kecepatan motor jauh lebih stabil dibandingkan dengan kontrol PID.

**Daftar Pustaka**

- [1] Bhim Singh and Sanjeev Singh (2009), “State of the Art on Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 9, No. 1, January 2009
- [2] Cheng-Tsung Lin, Chung-Wen Hung and Chih-Wen Liu (2008), “Position Sensorless Control for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Drives”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 23, No. 1, January 2008
- [3] Alex Simpkins and Emanuel Todorov (2010), “Position Estimation and Control of Compact BLDC Motors Based on Analog Linear Hall Effect Sensors”, *American Control Conference 2010, Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA* June 30-July 02, 2010
- [4] Y. Song, R. Dougal, L. Gao, A. Monti, F. Ponci (2005), “A Novel Brushless DC Motor Speed Estimator Based on Space-Frequency Localized Wavelet Neural Networks (WNNs)”, *IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp. 927-932, Austin, TX, March 2005.
- [5] Muammer Gokbulut And Ahmet Tekin (2006), “An Educational Tool for Neural Network Control of Brushless DC Motors”, *Int. J. Engng Ed.* Vol. 22, No. 1, pp. 197–204, 2006
- [6] Nam-Hun Kim, Oh Yang and Min-Huei Kim (2007), “BLDC Motor Control Algorithm for Industrial Applications Using a General Purpose Processor”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 7, No. 2, April 2007
- [7] Köroglu, Muhammed T.; Önkol, Mert; Efe, Mehmet Önder (2009), “Experimental modelling of propulsion transients of a brushless DC motor and propeller pair under limited power conditions: A neural network based approach”, *2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing* (2009), Turkey
- [8] Tan Chee Siong, Baharuddin Ismail, Siti Fatimah Siraj, Mohd Fayzul Mohammed (2011), “Fuzzy Logic Controller for BLDC Permanent Magnet Motor Drives”, *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS* Vol: 11 No: 02, 2011.
- [9] Amandeep Gill, “Speed Control Of Brushless DC Motor Using Artificial Neural Network Tuned PID Controller”, *Thesis, Electrical & Instrumentation Engineering Department Thapar University, Patiala*, 2012
- [10] Bambang Sujanarko, Mochamad Ashari. Mauridhi Hery Purnomo, “Neural Network Controller for Asymmetric Cascaded Multilevel Inverter”, *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Volume 11– No.6, December 2010. pp. 17-22.