

PERFORMA PENGENDALI ARUS STATOR DENGAN MENGGUNAKAN ANFIS PADA PENGEMUDIAN MOTOR INDUKSI BERBASIS *VECTOR CONTROL*

Muhammad Rizani Rusli¹, Era Purwanto¹, Anang Tjahjono¹, Arman Jaya¹, Ridwan², Handri Toar²

¹Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Kampus PENS,
Jl. Raya ITS Keputih Sukolilo Surabaya Indonesia

²Politeknik Negeri Batam,
Jl. Ahmad Yani, Teluk Tering, Batam Indonesia

Email: ruslirizani@gmail.com¹, era@pens.ac.id¹, anangtj@pens.ac.id¹, arman@pens.ac.id¹,
ridwan@polibatam.ac.id², toar@polibatam.ac.id²

Abstrak

Vector control terdiri atas dua pengendali arus stator *dq*-axis. Performa pengendalian motor induksi secara keseluruhan bergantung pada salah satu atau kedua pengendali arus stator tersebut. Umumnya pengendali arus stator menggunakan pengendali PI, namun pengendali ini memiliki beberapa kelemahan utama yaitu susahnya menentukan *gain* dari *proportional* maupun *integral*. ANFIS yang menggabungkan *fuzzy logic controller* dan *artificial neural network* menawarkan kemampuan *training*, adaptif, cepat, dan handal. Pada paper ini pengendali ANFIS diterapkan untuk pengendali arus stator *d*-axis pada pengemudian motor induksi berdaya 10 HP dengan metode pengemudian *vector control*. Keseluruhan sistemnya divalidasi melalui MATLAB/Simulink. Pengendali ANFIS dibandingkan dengan pengendali PI untuk mengevaluasi performa dari motor. Evaluasi performa yang diamati yaitu performa kecepatan dinamik dan performa arus dengan skema pengujian berbeban konstan dan bervariasi. Dari kedua pengujian, pengendali arus stator *d*-axis PI dan ANFIS menghasilkan *trend* respon kecepatan dinamik yang sama, namun pengendali arus stator *d*-axis ANFIS mampu mereduksi konsumsi arus fasa, *ripple* arus stator *d*-axis, dan THD arus fasa.

Kata Kunci: Motor Induksi, *Vector Control*, Pengendali Arus Stator, ANFIS.

Abstract

Vector control consists of two *dq*-axis stator current regulator. All performance of the induction motor depends on one or both of the stator current regulator(s). Commonly, the stator current regulator uses PI controller, but this controller has several major disadvantages, such as the difficulty of determining proportional and integral gain. ANFIS which combines fuzzy logic controllers and artificial neural networks offers training capabilities, adaptive, fast, and reliable. In this paper the ANFIS controller is applied to the *d*-axis stator current regulator in 10 HP induction motor drives with the vector control strategy. The entire system is validated through MATLAB / Simulink. ANFIS controller is compared to PI controller to evaluate the performance of the motor. The observed performance evaluation is the dynamic speed and current with a constant and varied load testing scheme. According to the both tests, the PI and ANFIS *d*-axis stator current regulator produced the same dynamic speed response trend, however the ANFIS *d*-axis stator current regulator was able to reduce the consumption of phase current, ripple of *d*-axis stator current, and phase current THD.

Keywords: Induction Motor, Vector Control, Stator Current Regulator, ANFIS.

1. PENDAHULUAN

Salah satu metode yang populer dan telah menjadi revolusi dalam pengendalian motor induksi (MI) yaitu *vector control*. *Vector control* menjadi sebuah metode yang umum digunakan dalam pengendalian MI untuk aplikasi variabel kecepatan dan sebagai penggerak karena keunggulannya yang memiliki performa dinamik yang tinggi, konsumsi energi yang rendah, dan efisiensi yang tinggi [1] [2] [3]. *Vector control* terdiri

atas *decoupling* dua komponen yaitu fluks dan torsi sehingga mampu dilakukan pengaturan secara terpisah layaknya motor DC penguat terpisah.

Untuk menghasilkan performa dinamik yang tinggi dan meningkatkan performa *steady state* pada *vector control* bisa dilakukan pengaturan kecepatan, torsi, flux, dan arus. *Vector control* terdiri atas dua *inner loop* pengendali arus stator (PAS) yang terdiri atas *d*-axis dan *q*-axis. Performa pengendalian MI secara keseluruhan bergantung pada *inner loop* PAS *dq*-axis

tersebut [4]. PAS *d*-axis dapat digunakan sebagai variabel kontrol untuk fluks rotor, sedangkan PAS *q*-axis menjadi variabel kontrol untuk torsi. Dalam pemodelan dinamik motor induksi, arus stator *dq*-axis ini juga akan mempengaruhi formasi dari arus fasa stator pada MI. Pemodelan arus fasa stator pada MI terbentuk atas vektor arus, tegangan, dan fluks dalam sistem koordinat *dq*-axis [5]. Sehingga memungkinkan didapatkan korelasi performa salah satu PAS *d*-axis atau *q*-axis ini akan mempengaruhi performa arus fasa stator pada MI. Bahkan pada [6] menyatakan bahwa arus *d*-axis merupakan variabel yang sangat berpengaruh untuk meminimalisasi rugi-rugi daya.

Telah banyak beberapa penelitian yang membahas tentang desain PAS *dq*-axis pada *vector control* dengan tujuan utama meningkatkan performa dinamik, optimasi efisiensi, dan mengurangi rugi-rugi daya [7]. Umumnya, pengendali PI merupakan *standard* yang dipakai dalam PAS *dq*-axis pada *vector control* karena memiliki kemampuan untuk mengatur sinyal dalam jangkauan frekuensi yang luas, handal, simple, dan desain yang mudah [4] [8]. Namun, PI juga memiliki kelemahan utama, yaitu tidak mudah mencari nilai terbaik dari *proportional gain* maupun *integral gain* [7].

Fuzzy logic controller (FLC) juga menjadi topik pilihan dalam isu PAS *dq*-axis karena implementasi yang mudah, parameter yang independen, tak membutuhkan model matematik secara detail, dan kemampuan menangani sistem yang nonlinear [7] [9] [10]. Hal yang menjadi tantangan terbesar dalam FLC yaitu penentuan *membership function* (MF) dengan pendistribusian yang optimum dan desain *rule* yang terbaik dan simpel [9]. Diantara PAS *dq*-axis yang menggunakan FLC seperti pada [11] dan [12]. Sementara pengendali *artificial neural network* (ANN) menawarkan kemampuan mekanisme *training*, adaptif, handal, dan cepat. Keunggulan ANN ini bisa digunakan untuk membentuk *rules* dan MF dari FLC melalui adaptasi dan algoritma *training* yang dikenal dengan *adaptive neuro*

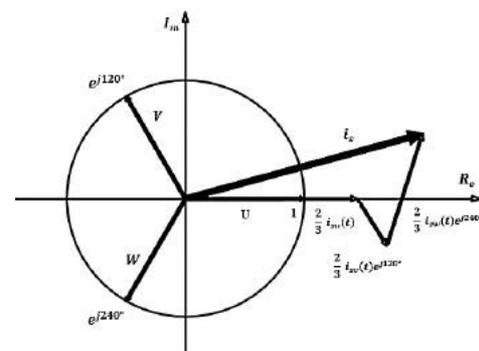
fuzzy inference system (ANFIS). ANFIS mampu menawarkan sistem yang cerdas dan efektif dengan fitur peningkatan konfigurasi dan performa [13]. Beberapa aplikasi ANFIS dalam *vector control* diantaranya mulai dari aplikasi estimator untuk kecepatan seperti pada [14], pengendalian kecepatan seperti pada [15] dan [16], kemudian untuk aplikasi pengendalian torsi seperti pada [13], hingga untuk optimasi efisiensi seperti pada [17].

Pada paper ini membahas tentang performa dari PAS *dq*-axis pada *vector control* yang menggunakan pengendali ANFIS. PAS dengan pengendali ANFIS digunakan untuk arus stator *d*-axis yang kemudian dianalisa performa kecepatan dinamik, arus *d*-axis dan arus fasa (dalam pengukuran peak dan RMS), serta *total harmonics distortion* (THD) dari arus fasa. Sementara pengendali ANFIS dibandingkan dengan pengendali PI dengan beberapa mekanisme pengujian, yaitu pengujian beban konstan, dan beban yang bervariasi. Validasi dari paper ini dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink.

2. METODE

2.1. Pengemudian Motor Induksi Berbasis *Vector Control*

Arus dari MI tersusun atas vektor yang kompleks dan dapat direpresentasikan dalam sistem koordinat *dq*-axis. Arus sinusoidal tiga fasa dapat dikombinasikan menjadi vektor arus stator i_s yang berputar terhadap frekuensi tertentu seperti pada (1) dan digambarkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Arus Stator Yang dibentuk dari arus Fasa

$$i_s = \frac{2}{3} [i_{su}(t) + i_{sv}(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{sw}(t)e^{j2(\frac{2\pi}{3})}] \quad (1)$$

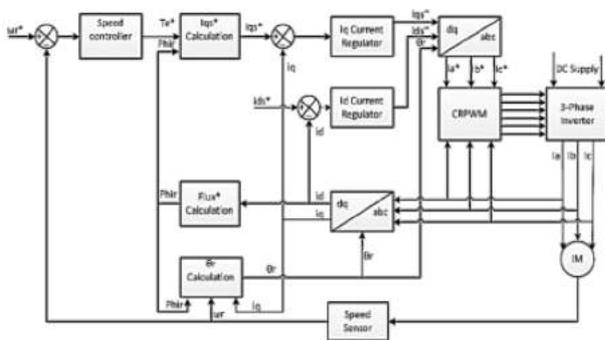
Dengan menggunakan ide ini untuk mengkombinasikan nilai *magnitude* tiga fasa yang lain seperti vektor tegangan dan *flux linkages* yang dapat ditentukan dengan kecepatan *angular* sebagai vektor *circulate*-nya. Kemudian sistem koordinat *dq*-axis yang berputar secara sinkron dengan semua vektor membagi *magnitude* tiga fasa menjadi dua komponen, yaitu *d* dan *q*. persamaan *magnitude* tegangan, arus, dan *flux linkage* dapat dinyatakan dalam (2), (3), dan (4).

$$u_s = u_{ds} + ju_{qs}; u_r = u_{dr} + ju_{qr} \quad (2)$$

$$i_s = i_{ds} + ji_{qs}; i_r = i_{dr} + jr_{qr} \quad (3)$$

$$\lambda_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs}; \lambda_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (4)$$

Dari pembagian dua komponen sistem koordinat (*dq*-axis) dimana *d*-axis identik dengan rotor fluks dan *q*-axis identik dengan torsi. Dari situlah muncul sebuah konsep bahwa MI bisa dilinearisasi dan diperlakukan seperti halnya motor DC penguat terpisah [18]. Gambaran sistem prinsip dari *vector control* tampak pada Gambar 2.



Gambar 1. Blok diagram *vector control*.

Vector control membutuhkan empat sinyal *feedback* dalam prosesnya. Yang pertama yaitu rotor speed (ω_r) yang diperoleh dari sensor kecepatan yang digunakan untuk *feedback* blok pengendalian kecepatan yang menghasilkan luaran berupa referensi torsi (T_e^*). Sinyal kontrol ini menjadi masukan untuk referensi arus stator *q*-axis (i_{qs}^*) melalui (5) dengan tambahan hasil estimasi fluks (Φ_{ir}) yang diperoleh dari (6) dan perhitungan kecepatan slip seperti pada (7). Dibutuhkan pula nilai

referensi arus stator *d*-axis (i_{ds}^*). Dalam hal ini menggunakan skema arus *d*-axis yang konstan.

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\lambda_r^*|} \quad (5)$$

$$|\lambda_r| = \frac{L_m \cdot i_{ds}}{1 + \tau_{rs}} \quad (6)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m}{\lambda_r^*} * \frac{R_r}{L_r} * i_{qs}^* \quad (7)$$

Tiga sinyal *feedback* lainnya yaitu sinyal hasil pembacaan arus fasa stator yang diperoleh dari pembacaan sensor arus yang ditransformasi ke arus stator *dq*-axis dengan menggunakan transformasi Clark-Park. Skema *vector control* pada paper ini menggunakan skema *indirect vector control*, sehingga koordinat transformasi bisa ditentukan dengan (8) [19]. Persamaan transformasi Clark dalam konversi *stationary frame* dapat dinyatakan dalam (9)-(10).

$$\theta_e = \int (\omega_m + \omega_{sl}) dt \quad (8)$$

$$i_\alpha = i_a \quad (9)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \quad (10)$$

Sedangkan persamaan transformasi Park dalam konversi *rotating frame* dinyatakan dalam (11) dan (12).

$$i_{ds} = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad (11)$$

$$i_{qs} = -i_\alpha \cdot \sin(\theta) + i_\beta \cdot \cos(\theta) \quad (12)$$

Arus referensi stator *dq*-axis dikurangkan dengan arus stator *dq*-axis hasil transformasi dan menghasilkan error dan menjadi masukan untuk 2 *inner loop* PAS. Performa dari MI yang dikendalikan dengan *vector control* bergantung pada *inner loop* tersebut [4]. Luaran 2 *inner loop* PAS (i_{ds}'' dan i_{qs}'') menjadi masukan untuk *inverse* transformasi Clark-Park. *Inverse* transformasi Park dinyatakan dalam (13)-(14). Sedangkan *inverse* transformasi Clark dirumuskan dalam (15)-(17).

$$i_\alpha = i_{ds}'' \cdot \cos(\theta) - i_{qs}'' \cdot \sin(\theta) \quad (13)$$

$$i_\beta = i_{ds}'' \cdot \sin(\theta) + i_{qs}'' \cdot \cos(\theta) \quad (14)$$

$$i_a = i_\alpha \quad (15)$$

$$i_b = -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \quad (16)$$

$$i_c = -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \quad (17)$$

Luaran dari transformasi Clark-Park digunakan untuk menghasilkan referensi arus fasa stator yang dibutuhkan dalam *current regulator* PWM (CRPWM) inverter. Inverter digunakan untuk pengemudian MI melalui

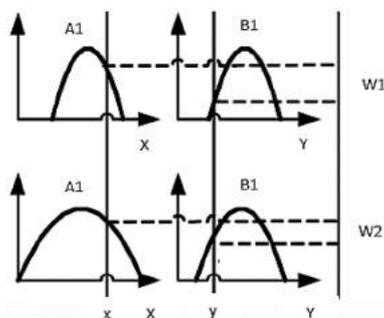
pengaturan frekuensi dan *magnitude* dari sinyal tiga fasa.

2.2. Pengendali ANFIS

FLC yang dikombinasikan dengan kemampuan *training* dari sistem ANN sering dikenal dengan ANFIS. ANFIS dimulai dengan kerangka kerja yang terstruktur, fleksibilitas *training* digunakan untuk menghasilkan MF dari masukan dan luaran melalui pengujian dari data yang ada. Data yang akan digunakan untuk *training* dapat disusun sejak awal dengan membuang data yang sekiranya tidak begitu penting, sehingga proses dibidang efektif. Data *training* harus ditentukan terlebih dahulu masukan dan luaran dari sistem target. Proses *training* mengambil respon terbaik dari sistem. Luaran dari proses *training* juga dapat diuji dengan mudah karena memiliki bentuk struktur linguistik. ANFIS menggunakan sistem Fuzzy Sugeno sebagai hasil dari efisiensi komputasi dan penggunaan prosedur yang serbaguna. Struktur dari ANFIS tersusun atas limas *layer* dengan fungsi yang berbeda pada tiap *layer*-nya [13]. Gambaran model dari ANFIS dengan mekanisme Fuzzy Sugeno tampak pada Gambar 3. Sebuah *rule* digunakan untuk mengolah dua fuzzy dengan aturan *if-then* seperti di bawah ini

Rule 1 : if x adalah A_1 dan y adalah B_1 kemudian $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 1 : if x adalah A_1 dan y adalah B_1 kemudian $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

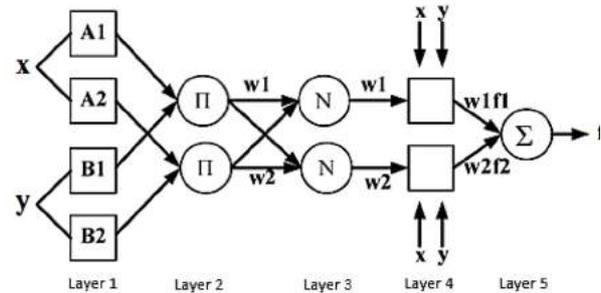


Gambar 2. Mekanisme Fuzzy Sugeno.

Struktur dari ANFIS tampak pada Gambar 4, dimana setiap *node* dalam setiap *layer* memiliki

fungsi yang sama. Tiap *node* dituliskan dalam *node l* dalam *layer l* yaitu $O_{l,i}$.

$$f = \frac{w_1f_1 + w_2f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1f_1 + \bar{w}_2f_2 \tag{18}$$



Gambar 3. Struktur ANFIS.

Layer 1: setiap *node l* dalam *layer* adalah *node* adaptif dengan persamaan *node* luaran sebagai berikut:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad \text{untuk } i = 1,2 \text{ atau} \tag{19}$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \quad \text{untuk } i = 3,4 \tag{20}$$

Dimana x atau y adalah masukan untuk *node i*, μ_A dan μ_B adalah fuzzy set yang digabungkan melalui fungsi *node*. Luaran dari *layer 1* yaitu nilai MF sebagai bagian dasar.

Layer 2: fungsi dari *node* yaitu mengalikan sinyal yang masuk dan setiap *node* dan dalam *layer* ini bernilai konstan. Luarannya menghasilkan derajat *rule* fuzzy. Persamaan dalam *layer 2* tampak pada (21).

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), \quad i = 1,2 \tag{21}$$

Setiap luaran *node* merepresentasikan kekuatan dari *rule*.

Layer 3: Tiap *node* dalam *layer* ini bernilai konstan. *Node* ke- i menjumlahkan semua *rule* yang ada. Persamaan dalam *layer* yang ketiga seperti pada (22).

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1,2 \tag{22}$$

Layer 4: Tiap *node* merupakan *node* yang adaptif. Tiap *node* dikalikan dengan parameter p , q , dan r . Persamaan dalam *layer 4* adalah sebagai berikut:

$$O_{4,i} = \bar{w}_if_i = \bar{w}_i(p_ix + q_iy + r_i) \tag{23}$$

Dimana w_i adalah menormalkan derajat aktivasi dari *layer 3* dan $p_iq_ir_i$ merupakan pengaturan parameter dari *node* ini yang dijadikan acuan parameter.

Layer 5: sebuah *node* tunggal dalam *layer* ini dan berbentuk tetap. *Node* tunggal ini akan

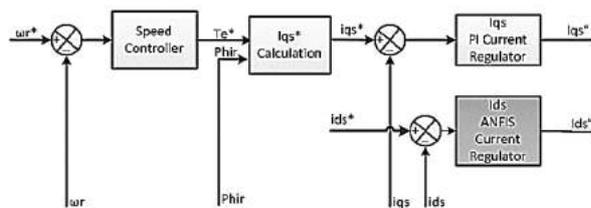
memproses semua penjumlahan dari masukan. Persamaan dari *layer 5* seperti pada (24).

$$O_{5,l} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad (24)$$

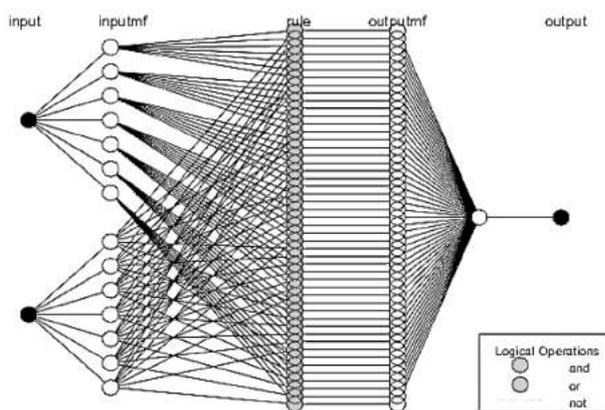
Kemudian, dari *layer* satu hingga *layer* lima dapat membentuk jaringan adaptif yang presisi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada paper ini ANFIS diterapkan pada PAS *d-axis* seperti yang tampak pada Gambar 5. Struktur dari ANFIS yang digunakan tampak pada Gambar 6 dengan komposisi MF masukan *error* dan *delta error* masing-masing berjumlah 7, jumlah *node* yang digunakan sebanyak 165 *node*, sementara tipe MF yang digunakan yaitu *triangular*. Metode *training* yang digunakan yaitu metode *hybrid*.



Gambar 4. PAS *d-axis* dengan menggunakan ANFIS pada skema *vector control*.

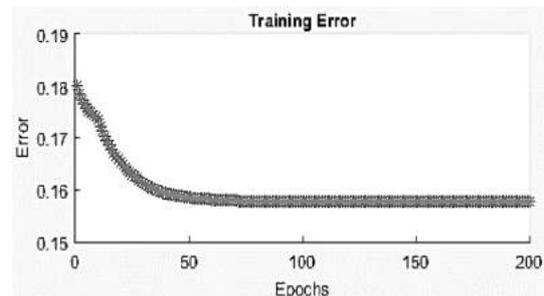


Gambar 5. Struktur ANFIS yang digunakan.

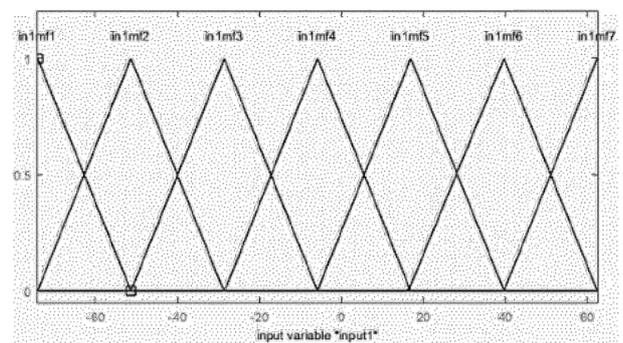
Masukan dari ANFIS berupa *error* (*e*) dan *delta error* (Δe) serta satu luaran berupa I_{ds}'' . *Error* didapatkan dari arus stator *d-axis* referensi dikurangkan dengan arus stator *d-axis* hasil transformasi. Sedangkan *delta error* merupakan *error* sekarang dikurangkan dengan *error* sebelumnya. Data untuk *training* diambil

dari beberapa jenis pengendali yang menghasilkan respon terbaik dengan beberapa variasi pengujian. Plot *error* hasil *training* dengan menggunakan metode *hybrid* tampak pada Gambar 7 dengan menghasilkan nilai *error* sebesar 0.157875%.

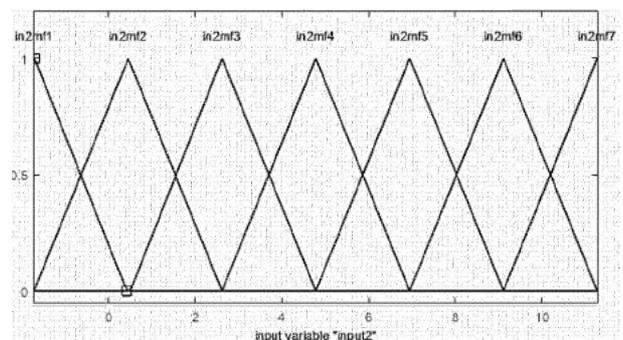
Luaran ANFIS berupa FIS dan *rule base*. *Rule base* yang dihasilkan sejumlah 49, dan MF yang dihasilkan terlihat pada Gambar 8. Gambar 8 (a) merupakan MF untuk masukan *error*, Gambar 8 (b) untuk masukan *delta error*, sedangkan luaran bertipe nilai konstan.



Gambar 6. Grafik *error* hasil *training*.



(a)



(b)

Gambar 7. (a) MF *error*. (b) MF *delta error*.

Untuk mengevaluasi performa dari PAS *d-axis* dengan ANFIS pada *vector control*, telah diterapkan pada MI berdaya 10 HP melalui

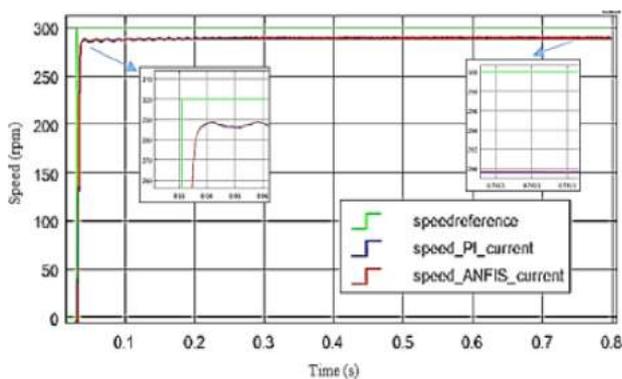
MATLAB/Simulink. Parameter motor yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Studi evaluasi diamati dalam dua kondisi operasi, yaitu dengan beban konstan dan beban bervariasi. ANFIS dibandingkan dengan PI kemudian diamati performa kecepatan dinamik, konsumsi arus fasa, arus stator *d*-axis, ripple arus stator *d*-axis dan THD arus fasa. Performa kecepatan dinamik yang diamati meliputi *rise time* (T_r), *settling time* (T_s), *steady state*, dan *error steady state* (ESS). Sementara THD arus fasa diukur dengan frekuensi *fundamental* 50 Hz.

Tabel 1. Parameter MI

Simbol	Kuantitas	Nilai dan Satuan
$V_{n(rated)}$	Nominal voltage	380V
$P_{n(rated)}$	Nominal power	10HP
$f_{n(rated)}$	Nominal frequency	50Hz
$\omega_{r(rated)}$	Nominal speed	1500rpm
$P_{(poles)}$	Poles	4
R_s	Stator resistance	0.7384Ω
L_s	Stator inductance	0.003045H
R_r	Rotor resistance	0.7402Ω
L_r	Rotor inductance	0.003045H
L_m	Mutual inductance	0.1241H
J	Inertia	0.0343m ²

3.1. Pengujian Beban Konstan

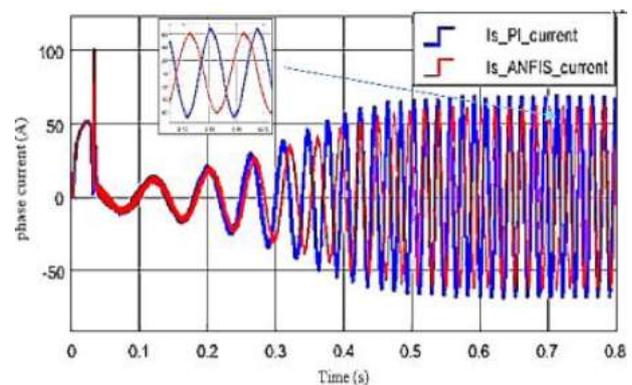
Dalam pengujian beban konstan beban yang dipakai yaitu sebesar 30 Nm. MI dioperasikan dalam beberapa kecepatan referensi, yaitu 300 rpm, 800 rpm, dan 1500 rpm.



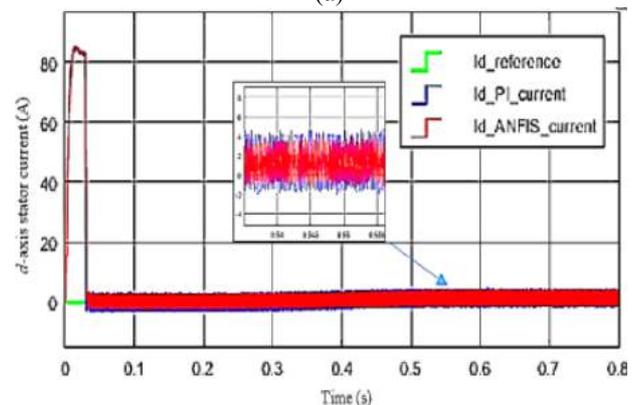
Gambar 8. Performa kecepatan saat 300 rpm.

Gambar 9 merupakan performa respon kecepatan dari pengoperasian MI saat referensi kecepatan 300 rpm. Dengan PAS *d*-axis PI, MI mengalami akselerasi ke kecepatan *steady state* selama 0.106 s dengan *rise time* 0.03486 s.

Nilai kecepatan *steady state* yang dicapai sebesar 289 rpm dengan ESS sebesar 3.6%. Sedangkan dengan menggunakan ANFIS memiliki *settling time* 0.104 s dengan *rise time* 0.03482 s dan nilai *steady state* sebesar 289 rpm sehingga memiliki ESS 3.6%. Antara PI dan ANFIS terjadi perbedaan waktu *settling time* sebesar 0.002 s dan nilai *rise time* sebesar 0.00004 s, namun nilai *steady state* dan ESS bernilai sama.



(a)



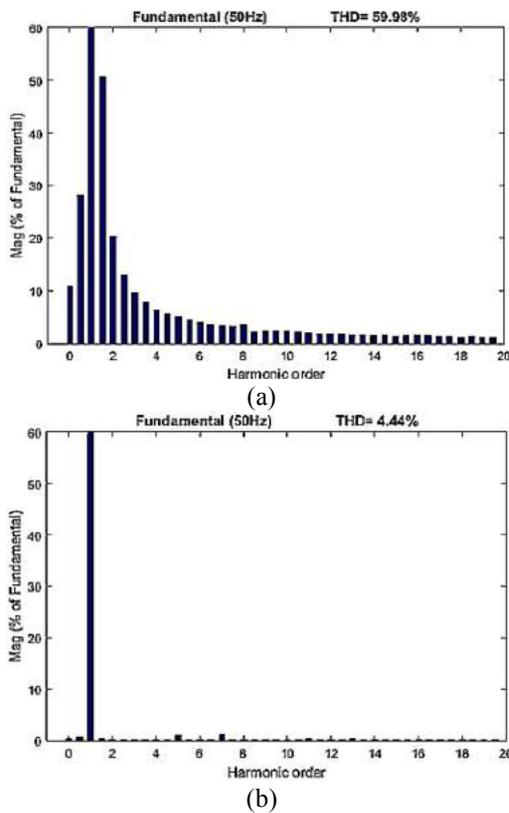
(b)

Gambar 9. Performa arus saat kecepatan 300 rpm. (a) arus fasa. (b) arus stator *d*-axis.

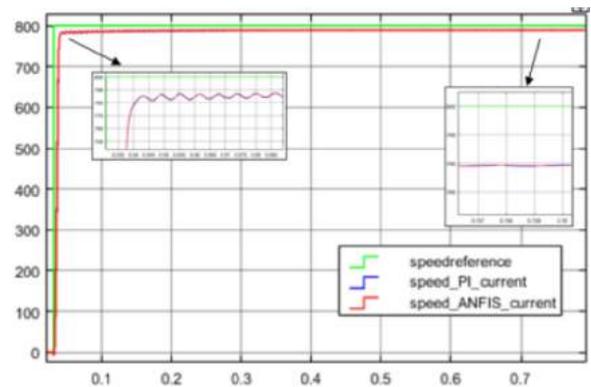
Dalam performa arus, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi arus 69.94 A pada arus fasa, sedangkan ANFIS mengkonsumsi 63.62 A. Keduanya dalam pengukuran *peak*. Untuk pengukuran RMS pada arus fasa, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi arus 35.89 A, sedangkan ANFIS mengkonsumsi 32.32 A. Untuk performa arus stator *d*-axis, PAS *d*-axis PI menghasilkan *ripple* arus sebesar 6.4 A, sedangkan ANFIS menghasilkan 5 A. Performa arus dalam referensi kecepatan 300 rpm tampak pada Gambar 10. (a) untuk performa arus fasa

dan (b) untuk arus stator *d*-axis. Dalam referensi kecepatan 300 rpm ini, PAS *d*-axis PI memiliki nilai arus *peak*, arus, RMS, dan *ripple* arus yang lebih besar bila dibandingkan dengan ANFIS. Selisih konsumsi arus fasa antara dua pengendali ini yaitu sebesar 6.34 A untuk pengukuran *peak*, 3.57 A dalam pengukuran RMS, dan 1.4 A untuk selisih *ripple* arus stator *d*-axis

Gambar 11 merupakan performa THD arus fasa, (a) untuk PAS *d*-axis PI dan (b) untuk PAS *d*-axis ANFIS. PI menghasilkan THD sebesar 59.98% sedangkan ANFIS memiliki THD sebesar 4.44% Terjadi perbedaan rentang 55.54% nilai THD dalam kasus ini.

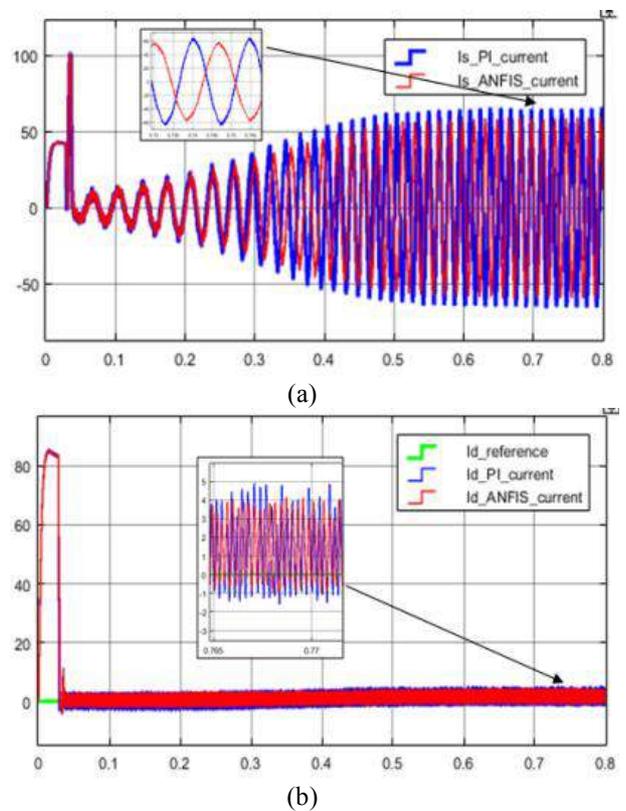


Gambar 10. THD arus fasa saat 300 rpm. (a) PAS *d*-axis dengan PI. (b) PAS *d*-axis dengan ANFIS.



Gambar 11. Performa kecepatan saat 800 rpm.

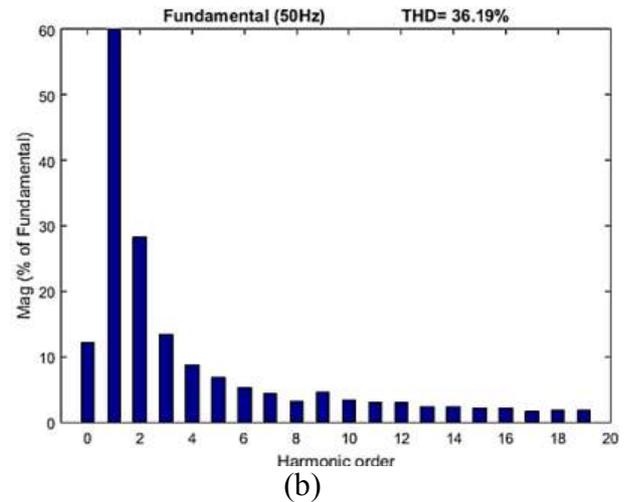
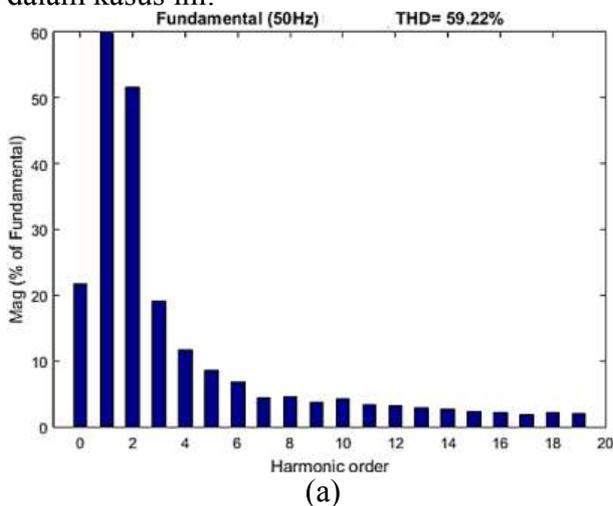
Referensi kecepatan diganti menjadi 800 rpm. Performa kecepatan dinamik untuk kecepatan ini tampak pada Gambar 12. Dengan PAS *d*-axis PI dan ANFIS, MI mengalami akselerasi ke kecepatan *steady state* dalam waktu yang sama, yaitu selama 0.224 s. Namun untuk *rise time*, PAS *d*-axis ANFIS menghasilkan waktu yang lebih cepat, yaitu 0.3718 s dan PI 0.03727 s. Sementara kecepatan *steady state* dan ESS yang dicapai memiliki nilai yang sama yaitu 789 rpm dengan ESS 1.375%.



Gambar 13. Performa arus saat kecepatan 800 rpm. (a) arus fasa. (b) arus stator *d*-axis

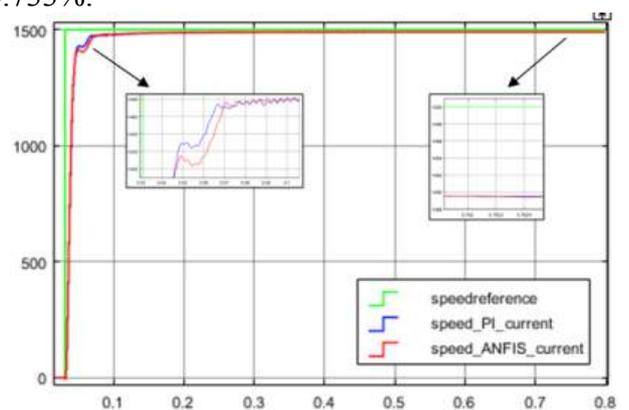
Gambar 13 (a) menunjukkan performa arus fasa MI, sedangkan (b) menunjukkan arus stator *d*-axis saat dioperasikan pada kecepatan 800 rpm. Dalam pengukuran *peak*, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi 65.4 A sedangkan ANFIS mengkonsumsi 58.6 A. Sementara dalam pengukuran RMS, PAS *d*-axis PI mengonsumsi 34.08 A dan ANFIS mengkonsumsi 30.69 A. *Ripple* arus stator *d*-axis yang dihasilkan PAS *d*-axis PI sebesar 6.8 A, sementara ANFIS menghasilkan 5.15 A. Dalam referensi kecepatan 800 rpm ini, PAS *d*-axis ANFIS memiliki nilai arus *peak*, arus, RMS, dan *ripple* arus yang lebih rendah bila dibandingkan dengan PI. PAS *d*-axis ANFIS mengkonsumsi arus fasa sebesar 6.8 A dalam *peak* dan 3.39 A dalam RMS lebih rendah dibandingkan dengan PI. *Ripple* arus stator *d*-axis juga demikian, PAS *d*-axis ANFIS menghasilkan 1.65 A lebih rendah daripada PI.

Sementara performa THD arus fasa untuk referensi kecepatan ini tampak pada Gambar 14. (a) untuk PI dan (b) untuk ANFIS. PI menghasilkan THD sebesar 59.22% sedangkan ANFIS menghasilkan THD sebesar 36.19%. Terjadi perbedaan rentang nilai 23.03% THD dalam kasus ini.

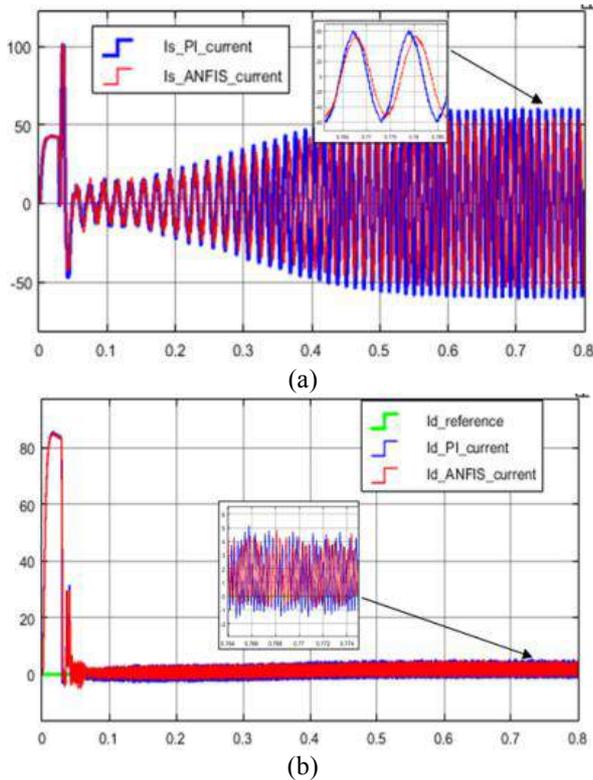


Gambar 14. THD arus fasa saat 800 rpm. (a) PAS *d*-axis dengan PI. (b) *d*-axis dengan ANFIS

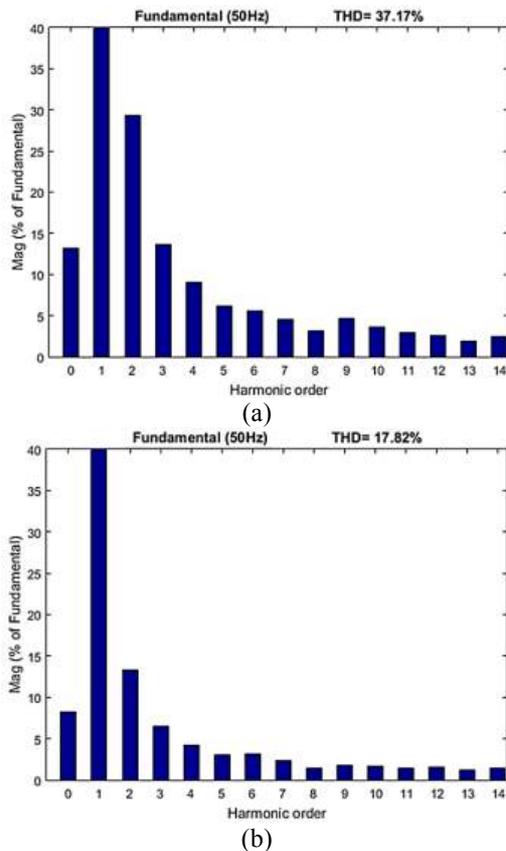
Pengujian dengan beban konstan yang terakhir diuji dengan referensi kecepatan 1500 rpm. Performa kecepatan dinamik untuk kecepatan nominal ini tampak pada Gambar 15. Dengan PAS *d*-axis PI dan ANFIS, MI memiliki *rise time* yang sama yaitu 0.04452 s. Sementara *settling time* untuk PI menghasilkan 0.167 s dan ANFIS 0.1654 s. Terdapat selisih 0.0016 s untuk *settling time*. Kecepatan *steady state* dan ESS yang dicapai kedua pengendali juga bernilai sama 1489 rpm dengan ESS 0.733%.



Gambar 15. Performa kecepatan saat 1500 rpm



Gambar 16. Performa arus saat kecepatan 1500 rpm. (a) arus fasa. (b) arus stator d-axis.



Gambar 17. THD arus fasa saat 1500 rpm. (a) PAS d-axis dengan PI. (b) PAS d-axis dengan ANFIS

Performa arus untuk kecepatan nominal ini tampak pada Gambar 16 (a) untuk arus fasa, sedangkan (b) untuk arus stator *d*-axis. Dalam pengukuran *peak*, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi 65.4 A sedangkan ANFIS mengkonsumsi 58.6 A. Sementara dalam pengukuran RMS, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi 34.08 A dan ANFIS mengkonsumsi 30.69 A.

Ripple arus stator *d*-axis yang dihasilkan PAS *d*-axis PI sebesar 6.8 A, sementara ANFIS menghasilkan 5.15 A. Dalam referensi kecepatan nominal ini terdapat selisih 6 A untuk arus fasa dalam *peak*, 2.97 A arus fasa dalam RMS, dan 1.6 A arus *ripple* stator *d*-axis.

Performa THD arus fasa untuk referensi kecepatan nominal ini tampak pada Gambar 17. (a) untuk PI dan (b) untuk ANFIS. PI menghasilkan THD sebesar 37.17% sedangkan ANFIS menghasilkan THD sebesar 17.82%. Terjadi perbedaan rentang nilai 19.35% THD dalam kasus ini.

Dari pengujian beban konstan dengan beberapa nilai referensi kecepatan yang telah dilakukan di atas, dapat dievaluasi performa kecepatan dinamik PAS *d*-axis PI dan ANFIS untuk semua nilai referensi menghasilkan *trend* yang sama dan perubahan nilai waktu yang sangat kecil. Pastinya, dengan referensi kecepatan nominal nilai kecepatan *steady state* dan ESS akan semakin kecil. Evaluasi performa kecepatan dinamik untuk pengujian beban konstan ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Dalam evaluasi performa arus pada pengujian beban konstan, tampak konsumsi arus dan *ripple* arus stator *d*-axis dari PAS *d*-axis ANFIS lebih kecil dibandingkan PI untuk semua referensi kecepatan. Demikian juga dalam performa THD arus fasa, PAS *d*-axis ANFIS memproduksi THD yang lebih rendah dibandingkan PI. Rentang nilai reduksi THD arus fasa dari PI yaitu 19.35% hingga 55.54%. Evaluasi performa arus ini bisa dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Evaluasi performa kecepatan dinamik saat pengujian beban konstan

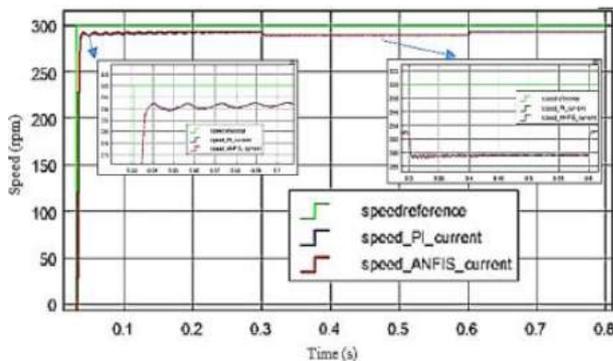
Kecepatan (rpm)	Td (s)		Ts (s)		Kecepatan steady state (rpm)		ESS (%)	
	PI	ANFIS	PI	ANFIS	PI	ANFIS	PI	ANFIS
300	0.03486	0.03482	0.106	0.104	289	289	3,6	3,6
800	0.03727	0.03718	0,224	0,224	789	789	1,375	1,375
1500	0.04452	0.04452	0,167	0,164	1489	1489	0,733	0,733

Tabel 3. Evaluasi performa arus saat pengujian beban konstan.

Kecepatan (rpm)	Ripple arus stator d-axis (A)		Arus fasa peak (A)		Arus fasa RMS (A)			THD arus fasa (%)
	PI	ANFIS	PI	ANFIS	PI	ANFIS	PI	ANFIS
300	6,4	5	69,94	63,62	35,89	32,32	59,98	4,44
800	6,8	5,15	65,4	58,6	34,08	30,69	59,22	36,19
1500	6,7	5,1	60	54	31,76	28,79	37,17	17,82

3.1. Pengujian Beban Bervariasi

Dalam pengujian yang kedua yaitu dengan mekanisme beban bervariasi dan kecepatan konstan. MI dioperasikan dalam referensi kecepatan 300 rpm dengan beban konstan 20 Nm dan diberi gangguan perubahan beban menjadi 30 Nm selama 0.3 s kemudian diamati performa kecepatan dan arusnya.

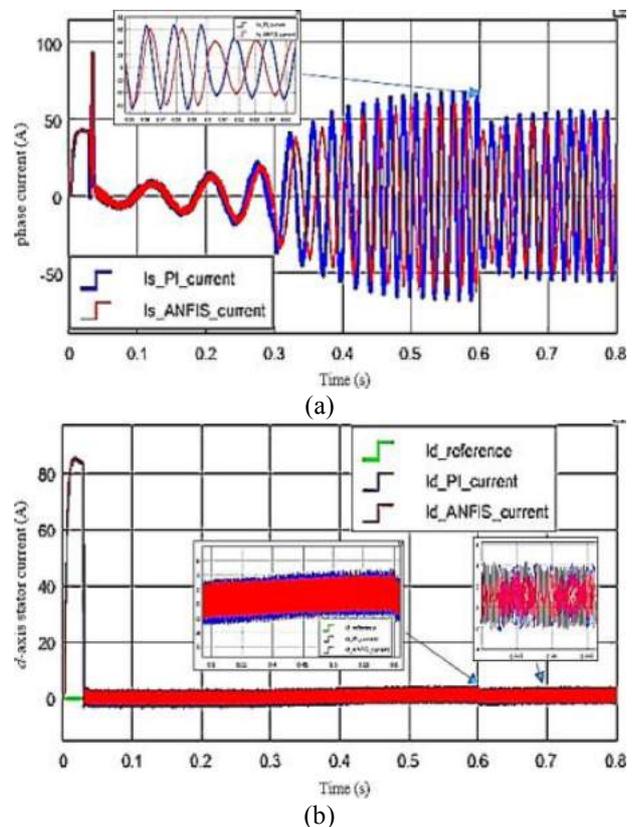


Gambar 12. Performa kecepatan saat kecepatan 300 rpm dengan perubahan beban.

Mula-mula MI dioperasikan pada kecepatan 300 rpm dengan beban 20 Nm, didapatkan nilai kecepatan *steady state* 293 rpm dengan ESS 2.33%. Pada waktu ke 0.3 s beban dirubah menjadi 30 Nm selama 0.3 s. Kecepatan *steady state* mengalami penurunan menjadi 289 rpm dengan ESS 3.6%. Setelah itu, dikembalikan ke beban awal 20 Nm dan nilai kecepatan *steady state* dan ESS sama seperti sedia kala sebelum terjadinya perubahan beban. *Trend* performa kecepatan dinamik antara PAS *d*-axis PI dan

ANFIS memiliki nilai yang sama. Performa speed dari pengujian dynamic load ini dapat dilihat pada Gambar 18.

Dalam performa arus, selama terjadi perubahan beban 30 Nm selama 0.3 s, PAS *d*-axis PI mengkonsumsi arus fasa *peak* mencapai 68.91 A. Setelah beban kembali ke semula 20 Nm, konsumsi arus fasa *peak* menjadi 56.23 A. Sementara untuk PAS *d*-axis ANFIS, selama beban 30 Nm mengkonsumsi arus fasa *peak* 62.49 A. Setelah beban kembali ke 20 Nm konsumsi arus fasa *peak* menjadi 51.48 A. Selama periode gangguan atau perubahan beban terjadi selisih nilai arus 6.42 A untuk arus fasa dalam *peak*. Performa arus pada pengujian kali ini dapat dilihat pada Gambar 19.

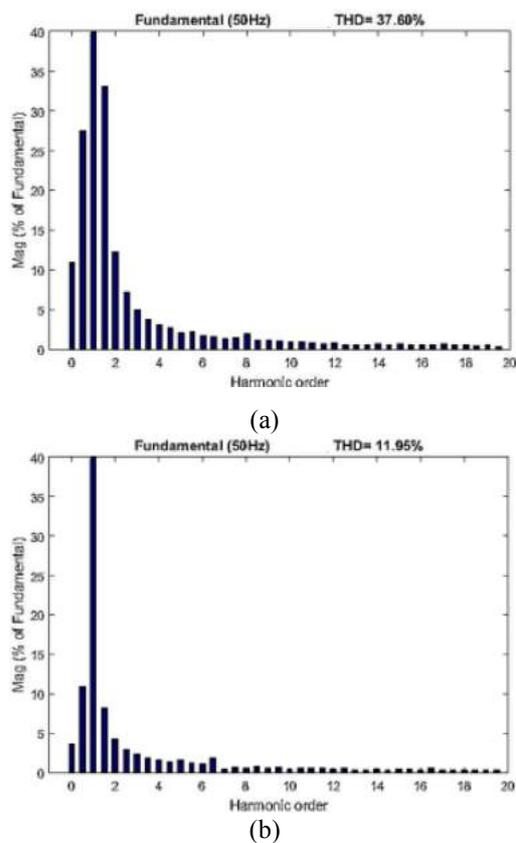


Gambar 13. Performa arus saat kecepatan 300 rpm dengan perubahan beban. (a) arus fasa. (b) arus stator *d*-axis.

Setelah gangguan dan mencapai kecepatan *steady state* PAS *d*-axis PI mengkonsumsi arus fasa 32.42 A, sementara ANFIS mengkonsumsi arus fasa 28.95 A. Semua dalam pengukuran RMS. Terjadi selisih nilai arus RMS sebesar 3.47 A untuk arus fasa. Dalam pengujian beban bervariasi kali ini, performa arus baik dalam

pengukuran *peak* ataupun RMS, PAS *d*-axis ANFIS mengkonsumsi arus yang lebih kecil dibandingkan PI.

Pada periode perubahan beban telah diamati pula performa THD arus fasa. Dalam Gambar 20 (a) performa THD arus fasa untuk PAS *d*-axis PI dan (b) untuk ANFIS. PAS *d*-axis PI menghasilkan THD arus fasa sebesar 37.6% sedangkan ANFIS menghasilkan 11.95% Terjadi perbedaan rentang 25.65% nilai THD dalam kasus ini.



Gambar 14. THD arus fasa saat kecepatan 300 rpm dengan perubahan beban. (a) PAS *d*-axis dengan PI. (b) PAS *d*-axis dengan ANFIS.

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan desain pengendali ANFIS untuk PAS *d*-axis pada pengemudian MI 10 HP yang berbasis *vector control* yang keseluruhan sistemnya telah divalidasi melalui MATLAB/Simulink. Kemudian dianalisa performa kecepatan dinamik, arus fasa (dalam pengukuran *peak* dan RMS), *ripple* arus stator *d*-axis, dan THD arus fasa. Pengujian dilakukan

dengan dua skema, yaitu dengan beban konstan dan beban yang bervariasi. PAS *d*-axis ANFIS dibandingkan dengan PAS *d*-axis PI untuk mengevaluasi performanya. Dari kedua pengujian, PI dan ANFIS menghasilkan *trend* respon kecepatan dinamik yang sama tetapi PAS *d*-axis ANFIS mampu mereduksi konsumsi arus fasa, *ripple* arus stator *d*-axis, dan THD arus fasa. Telah dibuktikan bahwa pengendali ANFIS yang digunakan mampu mengoptimasi performa pengendalian MI yang berbasis *vector control*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi – Politeknik Elektronika Negeri Surabaya atas beasiswa studi pascasarjana dan pendanaan penelitian tesis. Penulis juga berterimakasih kepada teman-teman *Electric Drives Research Group* PENS yang telah mendukung dan berkontribusi dalam penelitian ini. Semoga penelitian yang telah dilakukan bermanfaat dan barokah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Braslavsky, Z. Ishmatov, Y. Plotnikov and I. Averbakh, “Energy consumption and losses calculation approach for different classes of induction motor drives,” in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006*, Taormina, 2006.
- [2] I. Ferdiansyah, M. R. Rusli, B. Praharsena, H. Toar, Ridwan and E. Purwanto, “Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Indirect Field Oriented Control Based on Real-Time Control System,” in *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Bali, 2018.
- [3] M. N. Faizi and Marzuarman, “PENGONTROLAN FLUKS DAN TORSI PADA MOTOR INDUKSI 3

- FASA MENGGUNAKAN METODE DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) BERBASIS PI DAN FUZZY LOGIC CONTROLLERS (FLC),” *JURNAL INOVTEK POLBENG*, vol. 7, no. 2, pp. 139-145, 2017.
- [4] F. Briz, A. Diez, M. W. Degner and R. D. Lorenz, “Current and flux regulation in field-weakening operation [of induction motors],” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 42-50, 2001.
- [5] N. P. Quang and J.-A. Dittrich, *Vector Control of Three-Phase AC Machines System Development in the Practice*, New York Dordrecht London: Springer, 2015.
- [6] A. M. Bazzi and P. T. Krein, “Review of Methods for Real-Time Loss Minimization in Induction Machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, pp. 2319-2328, 2010.
- [7] M. A. Hannan, J. A. Ali, A. Hussain, F. H. Hasim, U. A. Ungku Amirulddin, M. N. Uddin and F. Blaabjerg, “A Quantum Lightning Search Algorithm-Based Fuzzy Speed Controller for Induction Motor Drive,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1214-1223, 2018.
- [8] J. A. Ali, M. A. Hannan and A. Mohamed, “IMPROVED INDIRECT FIELD-ORIENTED CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE BASED PSO ALGORITHM,” *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 6-2, pp. 27-32, 2016.
- [9] Z. Salleh, M. Sulaiman and R. Omar, “Tuning Fuzzy Membership Functions to Improve Performance of Vector Control Induction Motor Drives,” *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 1-4, 2016.
- [10] M. H. N. Talib, Z. Ibrahim, Z. Rasin, J. M. Lazi and M. Azri, “Investigation of Different Rules Size FLSC Performance Applied to Induction Motor Drive,” *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 9, no. 2-8, pp. 165-169, 2017.
- [11] J. L. Azcue-Puma, A. J. Sguarezi Filho and E. Ruppert, “Direct-FOC with Fuzzy Current Control for asynchronous machine,” in *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town, 2013.
- [12] F. F. M. El-Sousy and M. N. F. Nashed, “Robust Fuzzy Logic Current and Speed Controllers for Field-Oriented Induction Motor Drive,” *Journal of Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 115-123, 2003.
- [13] R. N. Mishra and K. B. Mohanty, “Real time implementation of an ANFIS-based induction motor drive via feedback linearization,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 1714-1730, 2016.
- [14] Z. Boussada, M. B. Hamed and L. Sbita, “Adaptive neuro-fuzzy inference system into induction motor: Estimation,” in *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Tunis, 2014.
- [15] E. Kılıç, Ş. Yılmaz, H. R. Özçalık and S. Şit, “A comparative analysis of FLC and ANFIS controller for vector controlled induction motor drive,” in *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, Side, 2015.
- [16] A. Mechernene, M. Zerikat and S. Chekroun, “Indirect field oriented adaptive control of induction motor based on neuro-fuzzy controller,” in *18th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Marrakech, 2010.

- [17] S. Hussain and M. A. Bazaz, "ANFIS implementation on a three phase vector controlled induction motor with efficiency optimisation," in *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*, Mumbai, 2014.
- [18] H. Purnata, A. D. Risdhayanti, S. A. Putri and A. Komarudin , "PENERAPAN METODE HYSTERESIS SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION PADA INVERTER TIGA FASA UNTUK PENGATURAN KECEPATAN DAN EFISIENSI MOTOR INDUKSI," *JURNAL INOVTEK POLBENG*, vol. 7, no. 2, pp. 111-118, 2017.
- [19] S. Hussain and M. A. Bazaz, "Review of vector control strategies for three phase induction motor drive," in *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, Noida, 2015.