

Implementasi Metode *Direct Torque Control* (DTC) dan *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) pada Konfigurasi *Dual Inverter* untuk Pengendalian Motor Induksi

Fadilah Apriliya Sari^{1*)}, Andhika Giyantara²⁾, dan Riza Hadi Saputra³⁾

^{1) 2) 3)} Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

Email korespondensi: *) 04221054@student.itk.ac.id

Abstrak – Motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam industri karena konstruksinya sederhana dan keandalan tinggi, namun memiliki keterbatasan berupa arus awal tinggi dan sensitivitas terhadap perubahan beban. Metode *Direct Torque Control* (DTC) konvensional memberikan respons dinamis cepat, tetapi masih memiliki kelemahan *torque ripple* tinggi dan frekuensi pensaklaran tidak konstan. Penelitian ini merancang dan menganalisis pengendali DTC berbasis *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (DTC-HBPWM) dengan kontroler PI pada konfigurasi *single* dan *Dual Inverter open-end winding*, dibandingkan dengan metode V/F melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan variasi beban 0–26,71 Nm (beban nominal). Pada rentang beban operasional normal (0–25 Nm), DTC-HBPWM *Dual Inverter* menghasilkan performa terbaik dengan *Torque Pulsation* (T_{pp}) konsisten 0,305–0,357 Nm, menurun hingga 95,07% dibandingkan V/F *Single Inverter*. Kecepatan dipertahankan pada 150 rad/s dengan SSE maksimal 0,014%, dibandingkan V/F yang mencapai SSE 18,886%. Fluktuasi daya mekanik turun hingga 96,0% dan torsi minimum selalu positif sehingga pembalikan torsi tereliminasi. Sebaliknya, *Dual Inverter* pada V/F justru menghasilkan T_{pp} lebih besar dari *Single Inverter*, membuktikan keunggulan *Dual Inverter* hanya terealisasi dengan kendali *closed-loop* yang tepat. Pada beban nominal 26,71 Nm, kedua konfigurasi DTC-HBPWM mengalami *loss of control* akibat *integrator windup* akibat keterbatasan tegangan *DC-link*, sehingga sistem direkomendasikan beroperasi hingga 25 Nm tanpa penyesuaian parameter PI lebih lanjut.

Kata Kunci: Motor Induksi, *Direct Torque Control* (DTC), *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM), *Dual Inverter*, *Open-End Winding*, *Torque Ripple*, Kontroler PI.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada aplikasi industri karena konstruksinya sederhana dan tingkat keandalannya tinggi [1]. Meskipun demikian, motor induksi memiliki karakteristik arus awal tinggi, faktor daya rendah, serta sensitif terhadap variasi beban sehingga memerlukan sistem kendali yang efektif untuk menjaga stabilitas torsi dan kecepatan rotor pada kondisi operasi dinamis [2]. *Direct Torque Control* (DTC) merupakan metode pengendalian yang mengatur torsi elektromagnetik dan fluks stator secara langsung melalui pemilihan kondisi switching inverter, sehingga menghasilkan respons torsi yang cepat tanpa memerlukan

transformasi kendali yang kompleks. Namun demikian, DTC konvensional masih memiliki kelemahan berupa *torque ripple* tinggi, frekuensi pensaklaran tidak konstan, serta sensitivitas terhadap perubahan parameter motor [3].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beberapa penelitian mengusulkan DTC berbasis *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikombinasikan dengan Kalman filter untuk mengestimasi fluks stator dan kecepatan motor tanpa sensor tambahan, meskipun frekuensi pensaklaran yang tetap konstan membuat respons sistem terhadap variasi beban belum optimal [4]. Perbandingan antara Sinusoidal PWM (SPWM) dan *Hysteresis Band PWM* (HBPWM) menunjukkan bahwa HBPWM menghasilkan respons kecepatan yang lebih cepat dan halus, serta bentuk gelombang arus dan tegangan yang lebih baik dibandingkan SPWM, sehingga teknik pensaklaran terbukti berpengaruh signifikan terhadap kualitas daya dan kinerja motor induksi [5].

Selain teknik pensaklaran, konfigurasi inverter turut menjadi fokus pengembangan penelitian terkini. Penerapan *Dual Inverter* pada motor induksi *open-end winding* yang dikombinasikan dengan *Field-Oriented Control* berbasis *backstepping* dan *observer* mampu memperluas ruang level tegangan serta memperhalus bentuk gelombang tegangan fasa stator, meskipun metode tersebut belum membahas performa *torque ripple* secara khusus [6]. Studi lain menerapkan *dual randomized decoupled PWM* pada DTC *open-end winding* untuk mereduksi kebisingan akustik pada aplikasi kendaraan listrik [7]. Pengendali Proportional-Integral (PI) banyak diterapkan pada sistem DTC karena mampu mengurangi *steady-state error* dan menghasilkan referensi torsi berdasarkan selisih kecepatan referensi dan kecepatan aktual rotor tanpa memerlukan informasi parameter beban secara langsung [8].

Dari perspektif desain kontroler, penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa akurasi estimasi fluks stator sangat menentukan kualitas keluaran DTC, karena kesalahan estimasi fluks akan langsung memengaruhi ketepatan pemilihan level tegangan pada tabel pensaklaran dan pada akhirnya memengaruhi kehalusan torsi yang dihasilkan [3]. Di sisi lain, penggunaan HBPWM sebagai pengganti tabel pensaklaran DTC klasik memungkinkan frekuensi pensaklaran yang lebih fleksibel karena bergantung langsung pada lebar pita hysteresis yang ditetapkan, berbeda dengan DTC klasik

yang frekuensinya bervariasi secara tidak terprediksi mengikuti kecepatan perubahan fluks dan torsi. Karakteristik ini menjadikan kombinasi DTC dan HBPWM cukup menarik untuk diteliti lebih lanjut, terutama ketika dipadukan dengan topologi inverter yang memiliki resolusi tegangan lebih tinggi seperti *Dual Inverter open-end winding*.

Selain aspek kualitas torsi dan kecepatan, keandalan sistem pada kondisi beban ekstrem juga menjadi pertimbangan penting dalam desain pengendali motor induksi untuk aplikasi industri. Kontroler PI konvensional yang banyak digunakan pada skema DTC rentan mengalami fenomena *integrator windup* ketika sinyal kendali yang diminta melebihi kemampuan aktuator, yang dalam konteks penggerak motor berarti keterbatasan tegangan *DC-link* yang tersedia. Fenomena ini jarang dibahas secara eksplisit pada penelitian-penelitian sebelumnya yang berfokus pada perbaikan kualitas torsi dan kecepatan pada kondisi beban normal, sehingga evaluasi batas operasional sistem akibat saturasi aktuator menjadi salah satu kontribusi penting penelitian ini.

Metode V/F konvensional, meskipun sederhana secara struktur, tidak dapat mengompensasi perubahan slip rotor karena tidak memiliki umpan balik kecepatan langsung, sehingga kecepatan aktual motor akan selalu berada di bawah nilai referensi dan mengandung deviasi meskipun pada kondisi tanpa beban [9]. Karakteristik *open-loop* ini menjadi pembanding penting untuk mengevaluasi seberapa besar perbaikan yang dapat dihasilkan oleh skema *closed-loop* seperti DTC-HBPWM, baik dari segi regulasi kecepatan maupun kualitas torsi dan daya mekanik yang dihasilkan.

Meskipun kombinasi DTC, HBPWM, dan *Dual Inverter* berpotensi meningkatkan performa pengendalian motor induksi, penelitian yang membandingkan secara kuantitatif konfigurasi *Single Inverter* dan *Dual Inverter* pada metode DTC-HBPWM sekaligus terhadap batas operasional sistem masih terbatas. Penelitian ini merancang dan menganalisis pengendali DTC berbasis HBPWM dengan kontroler PI pada konfigurasi *Single Inverter* dan *Dual Inverter open-end winding*, dibandingkan dengan metode V/F, melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan variasi beban 0 hingga 26,71 Nm (beban nominal). Kebaruan penelitian terletak pada evaluasi kuantitatif *torque pulsation*, *steady-state error*, *ripple* arus, fluktuasi daya mekanik, dan *ripple* fluks stator pada seluruh rentang beban operasional, termasuk identifikasi batas operasional sistem akibat keterbatasan tegangan *DC-link*.

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Sistem dan Parameter Motor

Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk membandingkan kinerja sistem penggerak motor induksi tiga fasa pada metode V/F tanpa kendali sebagai *baseline* dengan metode DTC-HBPWM pada konfigurasi *Single Inverter* dan *Dual Inverter open-end winding*. Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan dalam perancangan ditunjukkan pada Tabel 1, meliputi tegangan

rating 400 V, kecepatan rating 1430 rpm, frekuensi 50 Hz, induktansi magnetisasi (L_m) 0,1722 H, momen inersia 0,0131 kg·m², dan jumlah pole 4.

Tabel 1. Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan Rating	V_{LL}	400	V
Kecepatan Rating	n	1430	RPM
Frekuensi	f	50	Hz
Induktansi Bocor Stator	L_{ls}	0,005839	H
Induktansi Bocor Rotor	L_{lr}	0,005839	H
Induktansi Magnetisasi	L_m	0,1722	H
Momen Inersia	J	0,0131	kg·m ²
Jumlah Pole	N_p	4	-
Resistansi Stator	R_s	1,405	Ω
Resistansi Rotor	R_r	1,395	Ω

Skenario pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengendalian langsung (tanpa mekanisme kendali) untuk menunjukkan karakteristik dasar motor saat starting, kemudian dilanjutkan dengan metode V/F pada konfigurasi *Single Inverter* dan *Dual Inverter*, dan terakhir metode DTC-HBPWM pada kedua konfigurasi inverter yang sama. Setiap skenario diuji pada kondisi tanpa beban dan dengan variasi beban mekanik bertahap sebesar 5, 10, 15, 20, 25, dan 26,71 Nm (beban nominal) yang diberikan setelah sistem mencapai kondisi tunak. Parameter yang diamati dan dibandingkan pada setiap skenario meliputi karakteristik transien (arus *starting*, *overshoot* kecepatan, torsi transien), *torque pulsation* yang dihasilkan ditunjukkan pada (1).

$$T_{pp} = T_{max} - T_{min} \quad (1)$$

pada kondisi tunak), *steady-state error* kecepatan didapatkan dengan persamaan (2).

$$SSE = \omega_{ref} - \omega_{aktual} \quad (2)$$

dengan *ripple* arus stator, fluktuasi daya mekanik *peak-to-peak* ditunjukkan pada (3).

$$\Delta P = T_e \times \omega_r \quad (3)$$

serta *ripple* dan error fluks stator khusus untuk metode DTC-HBPWM.

B. Skema Pengujian

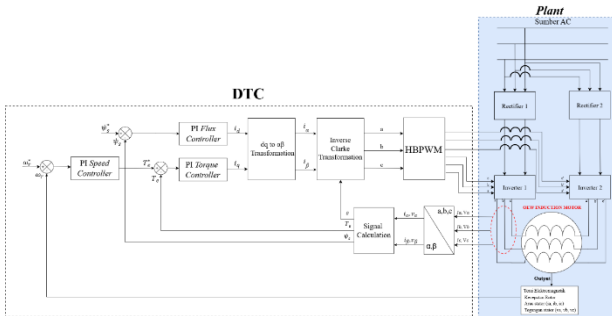
Validasi model simulasi dilakukan dengan memeriksa kesesuaian parameter keadaan tunak terhadap perhitungan analitis berbasis rangkaian ekuivalen motor induksi, khususnya untuk memastikan bahwa arus nominal, torsi nominal, dan slip pada beban rating sesuai dengan spesifikasi *name-plate* yang digunakan sebagai acuan perancangan. Selain itu, hasil pengendalian langsung (tanpa kendali) turut dijadikan pembanding awal untuk memastikan bahwa model motor merepresentasikan karakteristik *starting* yang wajar sebelum keempat skenario pengendalian (V/F dan DTC-HBPWM pada kedua konfigurasi inverter) dievaluasi lebih lanjut. Pendekatan bertahap ini penting untuk memastikan bahwa perbedaan performa yang diamati antar skenario benar-benar berasal dari perbedaan strategi kendali, bukan dari kesalahan pemodelan komponen.

C. Perancangan Pengendali DTC-HBPWM

Sistem DTC-HBPWM dirancang untuk mengendalikan torsi elektromagnetik dan fluks stator motor induksi secara langsung berdasarkan sinyal arus dan tegangan stator terukur, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Sinyal tegangan dan arus stator diproses pada blok *Flux and Torque Estimator* untuk menghasilkan estimasi magnitudo fluks stator dan torsi elektromagnetik pada koordinat alfa-beta. Nilai estimasi tersebut, bersama kecepatan aktual motor, diproses oleh dua *loop* kendali Proportional-Integral (PI) secara paralel, yaitu *loop* kendali fluks dengan referensi $\psi_{ref} = 0,8$ Wb dan *loop* kendali kecepatan dengan referensi $\omega_{ref} = 149,75$ rad/s (setara 1430 rpm), untuk menghasilkan arus referensi sumbu-d dan sumbu-q sesuai hukum kendali (4).

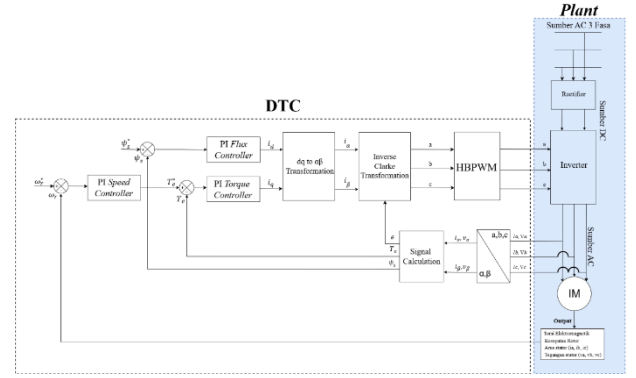
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3)$$

Arus referensi tersebut ditransformasikan ke koordinat alfa-beta melalui transformasi invers Park, kemudian ke sistem tiga fasa melalui transformasi invers Clarke. Selanjutnya, teknik *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) dengan lebar pita histeresis sebesar $\pm 0,25$ A (6% dari arus stator nominal 4,11 A) digunakan untuk menghasilkan sinyal pensaklaran keenam saklar IGBT pada konfigurasi *Single Inverter* dan kedua inverter pada konfigurasi *Dual Inverter open-end winding*. Pada konfigurasi *Dual Inverter*, tegangan fasa stator merupakan hasil selisih tegangan keluaran kedua inverter yang disuplai oleh tegangan *DC-link* sebesar 562,9 V, sehingga resolusi tegangan keluaran menjadi lebih halus dibandingkan konfigurasi *Single Inverter*.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Dual Inverter DTC-HBPWM

Sebagai pembandingan perancangan pengujian, Gambar 2 menyajikan diagram blok sistem *Single Inverter* DTC-HBPWM. Struktur kendalinya identik dengan konfigurasi *Dual Inverter* pada Gambar 1, yaitu tetap menggunakan estimasi fluks-torsi, dua *loop* PI, dan HBPWM, namun hanya menggunakan satu inverter dua-level tanpa skema *open-end winding*, sehingga resolusi tegangan keluaran yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan konfigurasi *Dual Inverter*.

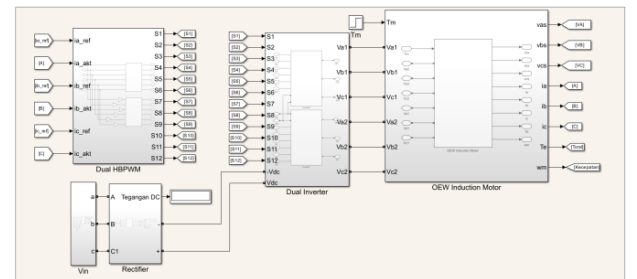


Gambar 2. Diagram Blok Sistem Single Inverter DTC-HBPWM

D. Perancangan Sistem Kendali V/F

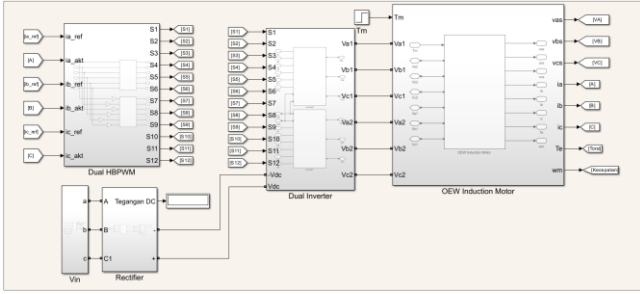
Sebagai pembandingan, metode V/F konvensional dirancang dengan menjaga rasio tegangan terhadap frekuensi tetap konstan ($V/f = 8$ V/Hz) agar fluks celah udara motor tetap terjaga pada berbagai kecepatan operasi. Metode ini bersifat *open-loop* karena tidak menggunakan umpan balik arus maupun kecepatan aktual motor, sehingga sinyal referensi tegangan tiga fasa langsung dibangkitkan berdasarkan frekuensi referensi dan diteruskan ke inverter melalui teknik SPWM. Ketidadaan mekanisme umpan balik inilah yang menyebabkan metode V/F tidak mampu mengompensasi penurunan kecepatan akibat slip ketika motor dibebani, berbeda dengan skema DTC-HBPWM yang menggunakan umpan balik kecepatan dan arus secara kontinu.

Perancangan *Dual Inverter Open-end winding* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Setiap ujung belitan stator motor dihubungkan ke dua inverter dua-level yang independen (Inverter 1 dan Inverter 2), masing-masing disuplai oleh sumber tegangan DC terpisah melalui *rectifier*. Sinyal pensaklaran S1-S12 yang dihasilkan oleh blok HBPWM diberikan ke kedua belas saklar IGBT pada kedua inverter, sehingga tegangan fasa efektif yang dilihat oleh motor merupakan selisih tegangan keluaran Inverter 1 dan Inverter 2. Konfigurasi *open-end winding* ini dipilih karena mampu menghasilkan jumlah level tegangan yang lebih banyak dibandingkan topologi *Single Inverter* konvensional tanpa memerlukan komponen tambahan seperti dioda *clamping* atau kapasitor *flying*, sehingga lebih sederhana dari sisi implementasi perangkat keras.



Gambar 3. Rangkaian Konfigurasi Dual Inverter Open-End Winding

Sebagai pembandingan, Gambar 4 menunjukkan rangkaian konfigurasi *Single Inverter* yang juga digunakan pada penelitian ini, yaitu pada skenario V/F *Single Inverter* maupun DTC-HBPWM *Single Inverter*. Berbeda dengan konfigurasi *Dual Inverter* pada Gambar 3, konfigurasi ini hanya menggunakan satu inverter dua-level tiga fasa yang terhubung langsung ke belitan stator motor induksi, sehingga jumlah level tegangan keluaran yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan konfigurasi *Dual Inverter open-end winding*.



Gambar 4. Rangkaian Daya Konfigurasi *Single Inverter* III.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi pengendalian langsung menjadi titik awal yang menunjukkan bahwa motor induksi tidak layak dioperasikan tanpa mekanisme pengendalian, karena arus transien pada fasa A mencapai 75,66 A, jauh melebihi arus keadaan tunak sebesar 4,11 A, disertai *overshoot* kecepatan 21,60% dan torsi transien 87,06 Nm. Kondisi ini terjadi karena pada saat *starting*, motor induksi menyerupai transformator dengan rotor hubung singkat sehingga impedansi rotor berada pada nilai yang sangat rendah dan arus hanya dibatasi oleh resistansi serta reaktansi bocor stator. Hasil ini menjadi dasar kuantitatif perlunya penerapan metode pengendalian V/F maupun DTC-HBPWM pada kelima skenario simulasi berikutnya.

A. Analisis Kecepatan Rotor dan *Steady-State Error*

Tabel 2 menunjukkan perbandingan kecepatan rotor dan *steady-state error* (SSE) keempat konfigurasi terhadap variasi beban. Pada kondisi tanpa beban, metode V/F *Single Inverter* mencapai kecepatan 149,741 rad/s (SSE = 0,173%) dan V/F *Dual Inverter* 149,740 rad/s (SSE = 0,173%), sedangkan kedua konfigurasi DTC-HBPWM mencapai 149,999 rad/s (SSE = 0,001%). Perbedaan ini membuktikan bahwa DTC-HBPWM mampu menekan SSE hingga 173 kali lebih kecil dibandingkan V/F pada kondisi tanpa beban, karena pengendali PI pada *loop* kecepatan secara kontinu menghitung sinyal koreksi berdasarkan galat (2), sementara metode V/F yang bersifat *open-loop* tidak memiliki mekanisme koreksi apa pun terhadap penurunan kecepatan akibat slip.

Pada beban 10 Nm, SSE V/F *Single Inverter* meningkat hampir 29 kali dari kondisi tanpa beban (dari 0,173% menjadi 4,954%) karena motor harus meningkatkan slip untuk menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih besar sesuai hubungan $\omega_r = \omega_s (1 - s)$, sedangkan DTC-HBPWM *Dual Inverter* hanya mengalami SSE 0,003%. Pada beban nominal 26,71 Nm, metode V/F tetap

mampu mempertahankan kestabilan meski dengan SSE tinggi (18,886% dan 18,361%) akibat slip 22,56%, sedangkan kedua konfigurasi DTC-HBPWM justru mengalami kegagalan kendali dengan kecepatan berbalik arah dan SSE melebihi 480%.

Tabel 2. Perbandingan Kecepatan Rotor dan SSE Seluruh Konfigurasi terhadap Variasi Beban

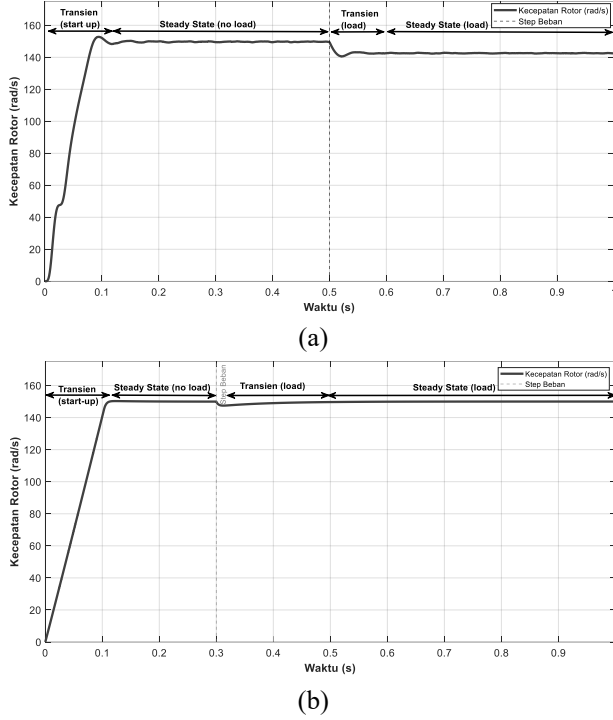
Beban (Nm)	V/F SI (rad/s)	V/F DI (rad/s)	DTC SI (rad/s)	DTC DI (rad/s)
0	149,741	149,740	149,999	149,999
5	146,372	146,364	149,997	149,997
10	142,569	142,597	149,995	149,996
15	138,157	138,239	149,992	149,994
20	132,679	132,913	149,989	149,991
25	125,222	125,736	149,976	149,979
26,71	121,671	122,458	-597,481	-577,225

Berdasarkan Tabel 2, hal ini terjadi karena ketika torsi beban melebihi torsi maksimum yang dapat dihasilkan sistem akibat keterbatasan tegangan *DC-link*, laju perubahan kecepatan $d\omega/dt$ menjadi negatif secara permanen sehingga rotor terus mengalami deselerasi hingga berbalik arah. Data pada baris 26,71 Nm Tabel 2 mengonfirmasi hal ini secara kuantitatif: DTC-HBPWM *Single Inverter* mencapai kecepatan -597,481 rad/s dan *Dual Inverter* -577,225 rad/s, keduanya bernilai negatif yang menandakan pembalikan arah putaran rotor, sedangkan V/F *Single* dan *Dual Inverter* tetap positif pada 121,671 rad/s dan 122,458 rad/s meskipun dengan SSE tinggi (18,886% dan 18,361%) akibat slip 22,56%.

Karakteristik transien juga menunjukkan perbedaan mencolok: *settling time* V/F meningkat drastis dari 0,096 s (tanpa beban) menjadi 0,506 s pada beban 10 Nm, sedangkan *settling time* DTC-HBPWM tetap konsisten di sekitar 0,105 s pada beban yang sama. *Overshoot* kecepatan pada kondisi tanpa beban juga berbeda signifikan antar konfigurasi DTC-HBPWM, *Single Inverter* menghasilkan *overshoot* 1,428% sedangkan *Dual Inverter* hanya 0,197%, menunjukkan bahwa resolusi level tegangan yang lebih tinggi pada konfigurasi *Dual Inverter* memungkinkan pembangkitan torsi yang lebih presisi pada fase percepatan awal sehingga kecepatan dapat meningkat mendekati referensi tanpa melampaui batas secara berlebihan.

Gambar 5 memperlihatkan secara visual perbedaan kualitas respons kecepatan antara kedua metode pada beban 10 Nm. Pada V/F *Single Inverter*, kecepatan *steady-state* turun menjadi 142,569 rad/s dengan *overshoot* 7,163% dan riak kecepatan yang terlihat jelas pada kondisi tunak akibat ketiadaan umpan balik. Sebaliknya, DTC-HBPWM *Dual Inverter* mempertahankan kecepatan pada 149,996 rad/s (SSE hanya 0,003%) dengan *overshoot* 0,199% dan *settling time* 0,105 s, serta kurva kecepatan yang jauh lebih halus pada kondisi tunak. Perbedaan visual ini konsisten dengan data numerik pada Tabel 2 dan memperkuat argumen bahwa mekanisme umpan balik kecepatan pada DTC-HBPWM memberikan keunggulan regulasi yang signifikan meskipun sistem beroperasi dengan beban yang

sama.



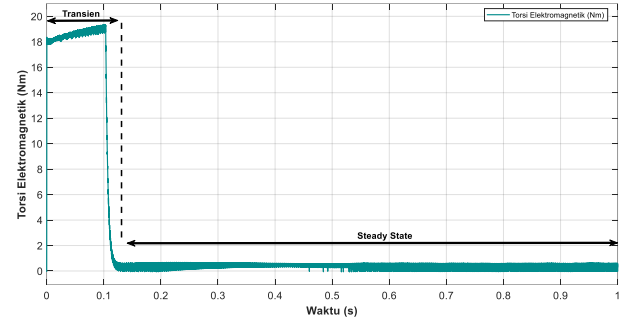
Gambar 5. Perbandingan Respons Kecepatan Rotor pada Beban 10 Nm: (a) V/F Single Inverter, (b) DTC-HBPWM Dual Inverter

B. Analisis Torsi Elektromagnetik (*Torque Pulsation*)

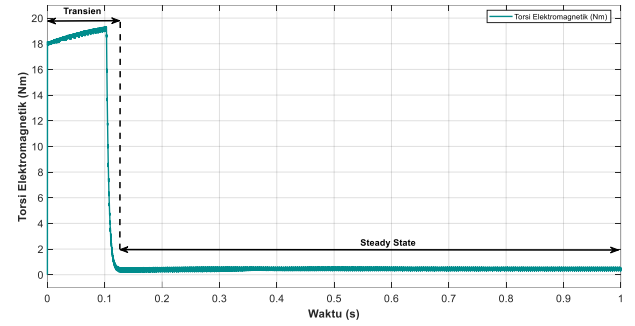
Tabel 3 menunjukkan superioritas DTC-HBPWM *Dual Inverter* dalam pengendalian torsi di seluruh rentang beban. Pada beban 15 Nm sebagai titik representatif, T_{pp} keempat metode adalah V/F *Single* = 6,415 Nm, V/F *Dual* = 7,243 Nm, DTC *Single* = 0,740 Nm, dan DTC *Dual* = 0,316 Nm, dengan rasio penurunan T_{pp} dari V/F *Single* ke DTC *Dual* mencapai 95,07% atau fluktuasi torsi berkurang hampir 20 kali lipat.

Tabel 3. Perbandingan *Torque Pulsation* (T_{pp}) Seluruh Konfigurasi terhadap Variasi Beban (Nm)

Beban (Nm)	V/F <i>Single Inverter</i>	V/F <i>Dual Inverter</i>	DTC <i>Single Inverter</i>	DTC <i>Dual Inverter</i>
0	7,633	8,116	0,627	0,305
5	6,980	7,872	0,693	0,310
10	6,564	7,596	0,726	0,312
15	6,415	7,243	0,740	0,316
20	6,296	6,787	0,812	0,324
25	5,628	6,184	1,006	0,357
26,71	5,573	5,914	0,012	0,014



(a)



(b)

Gambar 6. Perbandingan Gelombang Torsi Elektromagnetik Tanpa Beban: (a) *Single Inverter*, (b) *Dual Inverter* DTC-HBPWM

Sebagaimana ditunjukkan pada baris terakhir Tabel 3, nilai T_{pp} DTC-HBPWM pada beban 26,71 Nm turun drastis menjadi hanya 0,012 Nm (*Single Inverter*) dan 0,014 Nm (*Dual Inverter*), jauh lebih kecil dibandingkan beban 25 Nm (1,006 Nm dan 0,357 Nm). Nilai T_{pp} DTC-HBPWM pada beban 26,71 Nm tidak merepresentasikan kualitas torsi karena sistem sudah dalam kondisi *loss of control*. Sebaliknya, metode V/F pada beban yang sama justru mengalami kenaikan T_{pp} menjadi 5,573 Nm (*Single Inverter*) dan 5,914 Nm (*Dual Inverter*), pola yang konsisten dengan kegagalan V/F dalam meredam fluktuasi torsi seiring bertambahnya beban. Hal ini menunjukkan bahwa V/F *Dual Inverter* secara konsisten menghasilkan T_{pp} lebih besar dari V/F *Single Inverter* di seluruh variasi beban (selisih 6,3-16,5%) bertentangan dengan intuisi awal namun dapat dijelaskan secara ilmiah tanpa koordinasi aktif melalui kendali umpan balik, dua inverter yang beroperasi dengan SPWM menghasilkan komponen harmonik yang bersuperposisi secara tidak konstruktif sehingga T_{pp} menjadi lebih besar. Pada DTC-HBPWM *Dual Inverter*, T_{pp} meningkat secara perlahan dari 0,305 Nm (0 Nm) menjadi hanya 0,357 Nm (25 Nm), kenaikan 17,0% meski beban meningkat 25 Nm, membuktikan stabilitas kendali yang sangat kuat.

Hasil penurunan *torque ripple* pada penelitian ini sejalan dengan Azze dan Hameed [3] yang menunjukkan bahwa modifikasi skema DTC mampu menekan *torque ripple* secara signifikan dibandingkan DTC konvensional, meskipun penelitian tersebut tidak membahas pengaruh topologi *Dual Inverter* secara khusus. Dibandingkan dengan pendekatan Vo dkk. [4] yang menggunakan Kalman filter untuk estimasi fluks pada DTC berbasis PWM dengan frekuensi pensaklaran konstan, pendekatan HBPWM pada penelitian ini menghasilkan pita histeresis

arus yang secara langsung dan sederhana membatasi *ripple* tanpa memerlukan algoritma estimasi tambahan yang kompleks, meskipun konsekuensinya adalah frekuensi pensaklaran yang bervariasi mengikuti dinamika beban. *Trade-off* antara kesederhanaan implementasi dan konsistensi frekuensi pensaklaran ini menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan strategi modulasi untuk aplikasi praktis.

Secara matematis, peningkatan resolusi tegangan pada topologi *Dual Inverter* dapat dijelaskan melalui prinsip superposisi tegangan. Apabila Inverter 1 dan Inverter 2 masing-masing dapat menghasilkan tegangan diskrit sebanyak n level, maka tegangan fasa efektif yang dilihat motor berupa selisih keduanya dapat menghasilkan hingga $2n-1$ level tegangan berbeda. Peningkatan jumlah level tegangan ini memungkinkan pemilihan level tegangan yang lebih presisi pada algoritma HBPWM, sehingga arus dan torsi yang dihasilkan dapat mengikuti referensi dengan deviasi yang lebih kecil dibandingkan konfigurasi *Single Inverter* yang hanya memiliki dua level tegangan per fasa. Prinsip inilah yang mendasari konsistensi keunggulan DTC-HBPWM *Dual Inverter* di seluruh parameter yang diamati pada Tabel 2 hingga Tabel 6, karena resolusi tegangan yang lebih tinggi memberikan manfaat pada estimasi fluks, pembentukan arus, maupun kehalusan torsi secara bersamaan.

C. Analisis Ripple Arus Stator

Tabel 4 memperlihatkan bahwa *ripple* arus stator menunjukkan perbedaan fundamental antara V/F dan DTC-HBPWM dalam hal mekanisme umpan balik arus. Pada V/F *Single Inverter*, *ripple* arus meningkat secara tidak terkontrol dari 10,412 A (0 Nm) menjadi 42,823 A (26,71 Nm), peningkatan 311,3%, dan kondisi yang lebih buruk terjadi pada V/F *Dual Inverter* yang menghasilkan *ripple* lebih besar di hampir seluruh variasi beban. Sebaliknya, pada DTC-HBPWM *ripple* arus meningkat lebih terkontrol dari sekitar 9,5-9,9 A (0 Nm) menjadi 24,8 A (25 Nm), kenaikan 151,7-160,0% yang jauh lebih rendah dibandingkan V/F, karena mekanisme HBPWM membatasi deviasi arus dari referensi dalam pita $\pm 0,25$ A.

Tabel 4. Perbandingan *Ripple* Arus Stator Seluruh Konfigurasi terhadap Variasi Beban (A)

Beban (Nm)	V/F <i>Single Inverter</i>	V/F <i>Dual Inverter</i>	DTC <i>Single Inverter</i>	DTC <i>Dual Inverter</i>
0	10,412	8,710	9,853	9,526
5	11,679	12,500	10,896	10,923
10	16,775	17,864	13,535	13,326
15	23,106	24,015	16,860	16,831
20	30,231	31,085	20,726	20,699
25	38,959	39,640	24,799	24,775
26,71	42,823	43,140	15,240	17,060

Pada Tabel 4 beban 26,71 Nm menunjukkan *ripple* arus DTC-HBPWM anomali turun menjadi 15,240 A (*Single Inverter*) dan 17,060 A (*Dual Inverter*), lebih rendah dari

nilai pada beban 25 Nm (24,799 A dan 24,775 A). Nilai pada beban 26,71 Nm untuk DTC-HBPWM tidak merepresentasikan kondisi normal karena sistem mengalami kondisi *loss of control*, penurunan *ripple* ini merupakan sinyal kegagalan kendali, bukan perbaikan kualitas arus, karena bersamaan dengan penurunan drastis arus *steady-state* akibat rotor yang telah kehilangan sinkronisasi dengan referensi torsi. Sementara itu, *ripple* arus V/F pada beban 26,71 Nm mencapai nilai tertinggi di seluruh rentang pengujian, yaitu 42,823 A (*Single Inverter*) dan 43,140 A (*Dual Inverter*). Pada V/F beban 26,71 Nm, arus *steady-state* melebihi arus transien awal (13,921 A berbanding 11,344 A pada *Single Inverter*), mengindikasikan kondisi *overload* dengan slip 22,56% yang sangat tidak efisien dan berpotensi menyebabkan pemanasan berlebih pada belitan stator maupun rotor apabila berlangsung dalam waktu lama.

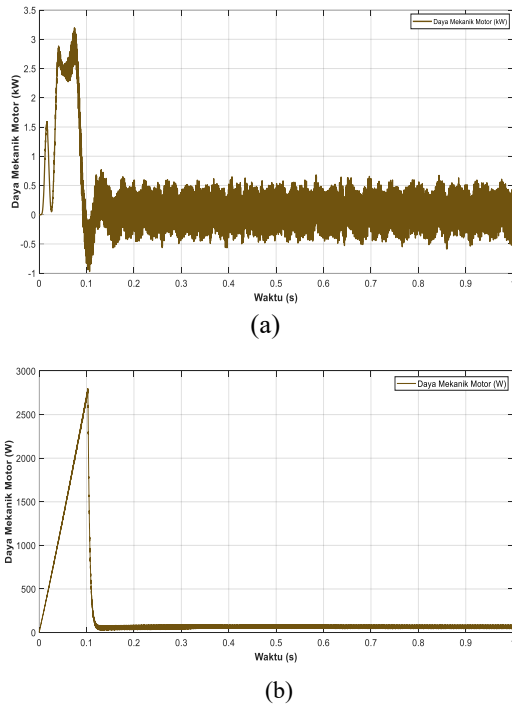
Perbedaan *ripple* arus ini juga berimplikasi pada efisiensi konversi energi. Pada DTC-HBPWM, arus stator senantiasa proporsional terhadap torsi yang dibutuhkan karena mekanisme estimasi torsi berbasis fluks dan arus terukur, sehingga tidak terjadi pemborosan arus magnetisasi berlebih seperti pada metode V/F yang mempertahankan rasio V/f konstan tanpa mempertimbangkan kondisi pembebanan aktual. Hal ini konsisten dengan penelitian Son dan Kim (2024) bahwa metode V/f konvensional cenderung menghasilkan fluktuasi arus lebih besar pada kondisi kecepatan variabel karena tidak adanya mekanisme adaptif terhadap perubahan beban [9].

Ditinjau dari sisi rating komponen daya, pola *ripple* arus yang lebih terkendali pada DTC-HBPWM juga berimplikasi pada pemilihan rating saklar IGBT dan kapasitor *DC-link* yang dibutuhkan. *Ripple* arus yang tinggi pada metode V/F, khususnya pada beban mendekati nominal, menuntut margin keamanan arus puncak yang lebih besar pada pemilihan komponen daya dibandingkan sistem yang dikendalikan dengan DTC-HBPWM, sehingga secara tidak langsung metode DTC-HBPWM berpotensi memungkinkan penggunaan komponen dengan rating yang lebih optimal tanpa mengurangi keandalan sistem, meskipun hal ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui analisis termal dan electro-thermal stress pada penelitian mendatang.

Sebagai catatan tambahan, *ripple* arus yang lebih rendah pada DTC-HBPWM juga berdampak positif terhadap rugi-rugi tembaga (*copper loss*) pada belitan stator, karena rugi-rugi tersebut berbanding lurus dengan kuadrat nilai RMS arus. Meskipun penelitian ini tidak menghitung secara eksplisit efisiensi energi keseluruhan sistem, arus RMS yang lebih rendah dan lebih stabil pada DTC-HBPWM mengindikasikan potensi efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan metode V/F, khususnya pada kondisi beban menengah hingga tinggi di mana perbedaan *ripple* arus antar metode semakin signifikan. Aspek efisiensi energi ini menjadi salah satu area yang dapat dieksplorasi lebih lanjut pada penelitian mendatang, misalnya dengan menambahkan perhitungan rugi-rugi daya secara eksplisit berdasarkan model termal motor dan inverter.

D. Analisis Fluktuasi Daya Mekanik

Pada beban 0 Nm, fluktuasi daya *peak-to-peak* keempat metode adalah V/F *Single* = 1142,525 W, V/F *Dual* = 1214,855 W, DTC *Single* = 94,121 W, dan DTC *Dual* = 45,669 W (Tabel 5), dengan rasio antara V/F *Single* dan DTC *Dual* mencapai 25,0 kali atau penurunan 96,0%. Penurunan ini merupakan yang paling signifikan dari seluruh parameter yang dibandingkan dan memiliki implikasi praktis besar motor yang beroperasi dengan fluktuasi daya mekanik kecil menghasilkan getaran mekanik lebih rendah, usia pakai *bearing* lebih panjang, dan kebisingan akustik lebih kecil.



Gambar 7. Perbandingan Kurva Daya Mekanik Tanpa Beban: (a) V/F *Single Inverter*, (b) DTC-HBPWM *Dual Inverter*

Perbedaan visual kedua metode ditunjukkan pada Gambar 7. Pada V/F *Single Inverter* (Gambar 7a), kurva daya mekanik beresolusi dengan amplitudo besar di sekitar rata-rata 62,991 W dan sempat bernilai negatif akibat pembalikan torsi sesaat. Sebaliknya, DTC-HBPWM *Dual Inverter* (Gambar 7b) menghasilkan kurva daya yang jauh lebih rata dan stabil di sekitar 68 W tanpa nilai negatif, sejalan dengan T_{pp} yang jauh lebih kecil (0,305 Nm berbanding 7,633 Nm). Perbandingan visual ini memperkuat data kuantitatif pada Tabel 5 bahwa penurunan T_{pp} berdampak langsung pada kehalusan kurva daya mekanik yang dihasilkan.

Tabel 5. Perbandingan Fluktuasi Daya Mekanik P-P Seluruh Konfigurasi terhadap Variasi Beban (W)

Beban (Nm)	V/F <i>Single Inverter</i>	V/F <i>Dual Inverter</i>	DTC <i>Single Inverter</i>	DTC <i>Dual Inverter</i>
0	1142,525	1214,855	94,121	45,669
5	1023,009	1151,851	103,942	46,592
10	934,117	1081,980	108,809	46,643

Beban (Nm)	V/F <i>Single Inverter</i>	V/F <i>Dual Inverter</i>	DTC <i>Single Inverter</i>	DTC <i>Dual Inverter</i>
15	885,136	999,923	111,003	47,080
20	837,378	901,051	122,094	48,446
25	705,922	776,752	150,923	52,971
26,71	682,899	723,834	-13,729	-14,286

Konsistensi fluktuasi daya DTC-HBPWM *Dual Inverter* pada rentang 45,7-53,0 W untuk beban 0-25 Nm membuktikan kesetaraan kualitas daya mekanik di seluruh kondisi operasi normal. Sebaliknya, V/F *Dual Inverter* menghasilkan fluktuasi daya yang lebih besar dari V/F *Single Inverter* di hampir seluruh variasi beban, yang kembali mengkonfirmasi bahwa keunggulan konfigurasi *Dual Inverter* hanya terwujud dengan pengendalian *closed-loop* yang tepat. Baris 26,71 Nm pada Tabel 5 memperlihatkan daya mekanik DTC-HBPWM berbalik menjadi negatif, yaitu -13,729 W (*Single Inverter*) dan -14,286 W (*Dual Inverter*). Nilai negatif pada beban 26,71 Nm menunjukkan motor beroperasi sebagai generator sesaat akibat pembalikan arah putaran pada kondisi *loss of control*, sehingga energi kinetik rotor dilepaskan kembali ke sistem alih-alih menghasilkan daya mekanik berguna. Sebaliknya, fluktuasi daya V/F pada beban yang sama tetap positif, yaitu 682,899 W (*Single Inverter*) dan 723,834 W (*Dual Inverter*), meskipun nilainya justru menurun dibandingkan beban 25 Nm karena kombinasi penurunan T_{pp} dan penurunan kecepatan rotor akibat slip yang besar.

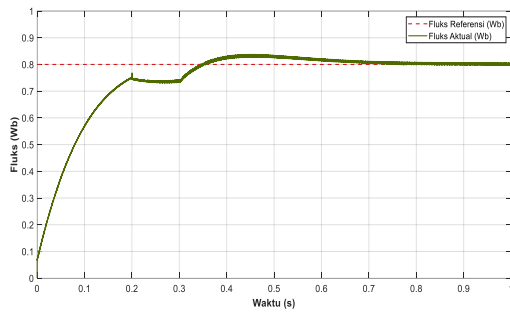
Hasil grafik fluktuasi daya yang rendah pada DTC-HBPWM *Dual Inverter* berkorelasi langsung dengan rendahnya *torque pulsation* yang telah dibahas pada Tabel 3, karena daya mekanik sesaat merupakan hasil kali langsung antara torsi elektromagnetik dan kecepatan rotor. Ketika torsi beresolusi dalam pita yang sempit dan kecepatan rotor relatif konstan pada nilai referensinya, fluktuasi daya yang dihasilkan pun otomatis menjadi kecil. Hubungan ini menegaskan bahwa perbaikan pada satu variabel kendali (torsi) memberikan efek berantai pada variabel turunan lainnya (daya mekanik), yang pada akhirnya berdampak pada keandalan mekanik motor secara keseluruhan dalam aplikasi jangka panjang.

E. Analisis *Ripple* Fluks Stator

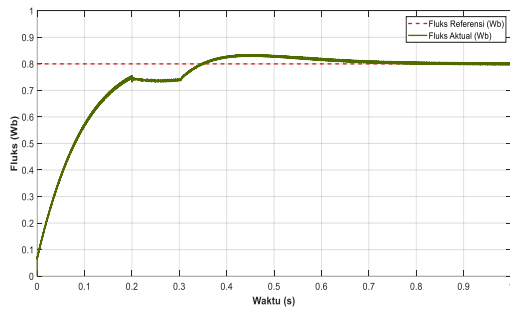
Perbandingan fluks stator (Tabel 6) hanya dilakukan antara DTC-HBPWM *Single* dan *Dual Inverter*, karena metode V/F tidak menggunakan estimasi fluks sehingga tidak memiliki data pembandingan. Pada rentang beban 0-15 Nm, ripple fluks *Dual Inverter* (1,145-1,250%) konsisten lebih rendah dari *Single Inverter* (1,503-1,769%), dengan rata-rata penurunan sekitar 30%. Pada beban 20-25 Nm, sistem *Dual Inverter* menunjukkan peningkatan *error* fluks (hingga 3,290% pada 25 Nm), mengindikasikan pendekatan batas kemampuan sistem, meskipun pada kondisi ini DTC-HBPWM *Dual Inverter* masih beroperasi normal dengan SSE kecepatan hanya 0,014%, membuktikan bahwa sistem toleran terhadap sedikit degradasi fluks selama torsi dan kecepatan masih terkendali. Namun pada beban nominal 26,71 Nm,

sebagaimana ditunjukkan pada baris terakhir Tabel 6, ripple fluks *Dual Inverter* melonjak drastis menjadi 21,570% dengan error fluks mencapai 88,809% terhadap referensi $\psi_{ref} = 0,8$ Wb, sementara *Single Inverter* mencatat ripple 1,840% dan error 0,226%. Lonjakan *error fluks* yang sangat besar pada konfigurasi *Dual Inverter* ini menegaskan bahwa kegagalan kendali pada beban nominal tidak hanya terjadi pada *loop* kecepatan, tetapi juga menyebabkan estimasi dan regulasi fluks stator kehilangan validitasnya sama sekali begitu sistem memasuki kondisi *loss of control*.

Peningkatan *error fluks* pada beban tinggi mengindikasikan bahwa kontroler PI pada *loop* fluks mulai mengalami keterbatasan dalam mempertahankan $\psi_{ref} = 0,8$ Wb ketika arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan torsi semakin besar, karena tegangan yang tersedia dari *DC-link* mulai mendekati batas kemampuannya. Kondisi ini menjadi indikator dini (*early warning*) sebelum sistem benar-benar mengalami kegagalan kendali pada beban nominal, sehingga error fluks dapat dijadikan salah satu variabel pemantauan tambahan dalam implementasi praktis untuk mendeteksi kondisi mendekati batas operasional sebelum terjadi *loss of control*.



(a)



(b)

Gambar 8. Perbandingan Trayektori Fluks Stator Tanpa Beban: (a) DTC-HBPWM *Single Inverter*, (b) DTC-HBPWM *Dual Inverter*

Dari sisi desain kontroler, hasil pada Tabel 6 juga mengindikasikan bahwa *loop* kendali fluks dan *loop* kendali kecepatan pada skema DTC-HBPWM tidak sepenuhnya independen satu sama lain, karena keduanya berbagi keterbatasan sumber daya yang sama, yaitu tegangan *DC-link*. Ketika torsi yang dibutuhkan meningkat mendekati batas kemampuan sistem, prioritas energi yang tersedia cenderung dialokasikan untuk mempertahankan komponen arus penghasil torsi (*iq*) sehingga komponen arus penghasil fluks (*id*) mengalami

sedikit penyimpangan lebih dahulu. Perilaku ini menjelaskan mengapa error fluks mulai meningkat pada beban 20-25 Nm jauh sebelum SSE kecepatan menunjukkan tanda-tanda degradasi yang berarti, dan dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi kendali prioritas (*priority-based control*) pada penelitian selanjutnya.

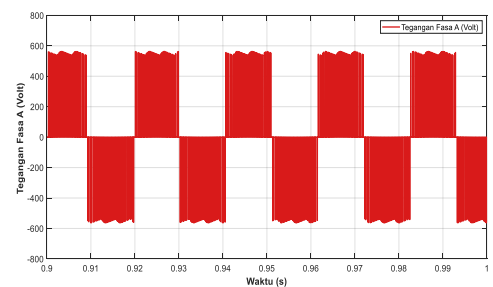
Perbedaan kestabilan fluks kedua konfigurasi DTC-HBPWM ditunjukkan secara visual pada Gambar 8. Trayektori fluks stator *Single Inverter* (Gambar 8a) membentuk lingkaran dengan pita yang lebih tebal, konsisten dengan *ripple* 1,738%. Trayektori fluks *Dual Inverter* (Gambar 8b) tampak lebih tipis dan mendekati lingkaran sempurna dengan radius yang lebih konstan di sekitar 0,8 Wb, konsisten dengan *ripple* yang lebih rendah (1,170%) akibat resolusi level tegangan yang lebih tinggi.

Tabel 6. Perbandingan *Ripple* dan Error Fluks Stator DTC-HBPWM terhadap Variasi Beban (%)

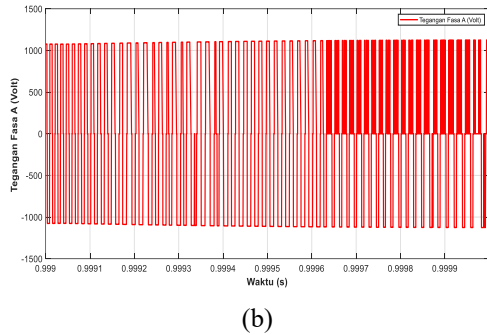
Beban (Nm)	V/F <i>Single Inverter</i>	V/F <i>Dual Inverte</i>	DTC <i>Single Inverter</i>	DTC <i>Dual Inverter</i>
0	1,738	0,157	1,170	0,158
5	1,769	0,178	1,145	0,160
10	1,686	0,173	1,160	0,158
15	1,503	0,261	1,250	0,181
20	2,335	0,268	1,905	0,248
25	1,628	0,285	2,058	3,290
26,71	1,840	0,226	21,570	88,809

F. Analisis Tegangan Stator

Selain kecepatan, torsi, arus, daya, dan fluks, karakteristik tegangan keluaran turut dianalisis untuk memahami perbedaan mendasar pola pensaklaran antara metode V/F dan DTC-HBPWM pada seluruh variasi beban. Baik metode V/F maupun DTC-HBPWM menghasilkan tegangan *line-to-line* dengan amplitudo yang mendekati tegangan *DC-link* sebesar 562,9 V pada seluruh kondisi beban (0-26,71 Nm), karena keduanya dibatasi oleh kapasitas suplai daya yang sama. Perbedaan mendasar terletak pada pola modulasi V/F menggunakan SPWM dengan frekuensi pensaklaran konstan 47,75 Hz yang tidak berubah terhadap beban karena rasio V/f dijaga tetap, sedangkan DTC-HBPWM menggunakan HBPWM dengan frekuensi pensaklaran variabel yang menyesuaikan secara adaptif terhadap *error* torsi dan fluks sesaat.



(a)



Gambar 9. Perbandingan Tegangan *Line-to-Line* Stator Fasa A Tanpa Beban: (a) V/F *Single Inverter*, (b) DTC-HBPWM *Dual Inverter*

Gambar 9 memperlihatkan perbedaan pola tersebut pada fasa A kondisi tanpa beban. Tegangan V/F *Single Inverter* (Gambar 9a) menampilkan pola SPWM dua-level dengan lebar pulsa yang bervariasi secara teratur mengikuti modulasi sinusoidal, menghasilkan gelombang yang tampak simetris dan mudah diprediksi. Sebaliknya, tegangan DTC-HBPWM *Dual Inverter* (Gambar 9b) menampilkan pola multilevel dengan lebar pulsa tidak beraturan karena keluaran merupakan selisih dua inverter yang disaklar berdasarkan tabel histeresis torsi dan fluks, menghasilkan resolusi tegangan lebih tinggi meski pada frekuensi pensaklaran yang tidak konstan.

Tabel 7. Perbandingan Karakteristik Tegangan Keluaran Seluruh Konfigurasi

Parameter	V/F Single	V/F Dual	DTC Single	DTC Dual
Pola Modulasi	SPWM 2-level	SPWM 2-level	HBPWM 2-level	HBPWM multilevel
Frekuensi Switching	Konstan 47,75 Hz	Konstan 47,75 Hz	Variabel	Variabel
Amplitudo Teg. L-L	≈562,9 V	≈562,9 V	≈562,9 V	≈562,9 V
Respons thd Beban 0-25 Nm	Tetap	Tetap	Adaptif	Adaptif, lebih presisi
Kondisi Beban 26,71 Nm	Pola tetap, pergeseran fasa membesar	Pola tetap, pergeseran fasa membesar	Distorsi signifikan (loss of control)	Distorsi signifikan, kolaps bersama fluks

Berdasarkan Tabel 7, amplitudo tegangan tidak menjadi pembeda utama antar metode karena keduanya dibatasi oleh tegangan *DC-link* yang sama, melainkan pola dan frekuensi pensaklaranlah yang menentukan kualitas gelombang arus dan torsi yang dihasilkan. Pada beban nominal 26,71 Nm, tegangan V/F tetap mempertahankan pola SPWM yang teratur meskipun disertai pergeseran fasa yang lebih besar akibat penurunan

faktor daya pada slip 22,56%, sedangkan tegangan DTC-HBPWM justru mengalami distorsi signifikan yang terjadi bersamaan dengan kolapsnya fluks stator (Tabel 6) dan pembalikan arah kecepatan rotor (Tabel 2). Hal ini mengonfirmasi bahwa distorsi tegangan pada DTC-HBPWM merupakan gejala lanjutan dari kegagalan estimasi fluks-torsi, bukan penyebab utama kegagalan kendali.

G. Pembahasan Keseluruhan dan Batas Operasional Sistem

Keunggulan DTC-HBPWM *Dual Inverter* yang ditunjukkan pada Tabel 2-6 memiliki batas operasional yang jelas. Pada beban nominal 26,71 Nm, kedua konfigurasi DTC-HBPWM mengalami kegagalan pengendalian (loss of control) yang ditandai dengan perubahan arah putaran rotor, SSE melebihi 480%, serta penurunan fluks stator hingga 88,8% di bawah nilai referensi pada konfigurasi *Dual Inverter*. Kegagalan tersebut disebabkan oleh fenomena *integrator windup* pada pengendali PI yang terjadi ketika referensi torsi yang diminta melebihi torsi maksimum yang mampu dihasilkan sistem akibat keterbatasan tegangan *DC-link*. Sebaliknya, metode V/F pada beban yang sama tetap mampu mempertahankan kestabilan operasi karena struktur kendalinya yang lebih sederhana tidak memiliki mekanisme integrator yang rentan mengalami windup, meskipun kualitas regulasinya jauh lebih rendah.

Perbandingan menyeluruh terhadap kelima parameter yang diamati (kecepatan, torsi, arus, daya, dan fluks) menunjukkan pola yang konsisten pada metode V/F, penambahan inverter kedua tidak memberikan manfaat karena tidak ada mekanisme kendali aktif yang mengoordinasikan kedua inverter, sedangkan pada metode DTC-HBPWM, penambahan inverter kedua secara konsisten meningkatkan seluruh aspek kinerja. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat topologi *Dual Inverter open-end winding*, yang secara matematis merupakan selisih keluaran dua inverter sehingga meningkatkan resolusi level tegangan, hanya dapat direalisasikan apabila didukung oleh mekanisme kendali aktif berupa umpan balik arus kontinu (HBPWM) dan umpan balik kecepatan (DTC). Perbandingan ini juga menunjukkan adanya trade-off mendasar antara presisi pengendalian dan ketahanan terhadap saturasi aktuatur, sehingga hasil ini menjadi pertimbangan penting sebelum metode DTC-HBPWM diterapkan pada aplikasi dengan kemungkinan kondisi *overload*.

Konsistensi hasil pada seluruh parameter yang diamati juga mengindikasikan bahwa perbaikan kinerja pada sistem penggerak motor induksi tidak dapat diperoleh hanya dengan mengubah satu aspek desain secara terpisah. Penambahan *Dual Inverter* tanpa strategi kendali yang sesuai, sebagaimana ditunjukkan pada hasil V/F, justru dapat memperburuk kinerja akibat interferensi harmonik yang tidak terkoordinasi. Sebaliknya, kombinasi strategi kendali *closed-loop* (DTC) dengan teknik modulasi berbasis umpan balik langsung (HBPWM) dan topologi inverter dengan resolusi tegangan lebih tinggi (*Dual Inverter open-end winding*) saling melengkapi dan menghasilkan efek sinergis yang

jauh lebih besar dibandingkan kontribusi masing-masing elemen secara terpisah. Temuan ini memberikan wawasan penting bahwa optimasi sistem penggerak motor induksi perlu dipandang secara holistik, mempertimbangkan interaksi antara topologi daya, teknik modulasi, dan strategi kendali secara bersamaan, bukan sebagai tiga elemen yang saling independen.

H. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil. Pertama, seluruh hasil diperoleh murni dari simulasi MATLAB/Simulink tanpa validasi eksperimental pada perangkat keras, sehingga faktor non-ideal seperti rugi-rugi saklar, *dead-time* inverter, dan variasi parameter motor akibat suhu operasi belum diperhitungkan. Kedua, kontroler PI yang digunakan belum dilengkapi mekanisme *anti-windup*, sehingga perilaku sistem pada kondisi beban mendekati atau melampaui torsi nominal tidak merepresentasikan performa yang dapat dicapai apabila mekanisme proteksi tersebut diterapkan. Ketiga, parameter HBPWM (lebar pita histeresis $\pm 0,25$ A) dan parameter PI ditetapkan secara tetap berdasarkan studi awal, sehingga belum dilakukan optimasi sistematis seperti *fuzzy logic*, *ziegler-nichols* atau algoritma metaheuristik yang berpotensi menghasilkan kinerja lebih baik. Keterbatasan-keterbatasan ini menjadi arah penting bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis sistem pengendalian motor induksi tiga fasa dengan metode V/F tanpa kendali dan DTC-HBPWM pada konfigurasi *single* dan *dual inverter* (variasi beban 0–26,71 Nm), dapat disimpulkan bahwa sistem DTC berhasil dirancang untuk mengendalikan torsi elektromagnetik dan fluks stator secara langsung melalui pemilihan level tegangan optimal pada setiap siklus pensaklaran tanpa memerlukan transformasi koordinat yang kompleks, dengan kontroler PI pada *loop* kecepatan menekan SSE hingga 173 kali lebih kecil dibandingkan V/F pada beban normal (0–25 Nm). HBPWM juga berhasil diimplementasikan sebagai teknik pensaklaran pada kedua konfigurasi inverter dengan pita histeresis $\pm 0,25$ A, terbukti menekan *ripple* arus hanya naik 151,7–160,0% (0→25 Nm) dibandingkan V/F yang naik hingga 311,3%, menunjukkan superioritas umpan balik arus kontinu. Pada rentang beban tersebut, konfigurasi *dual inverter* DTC-HBPWM menghasilkan performa terbaik dengan T_{pp} 0,305–0,357 Nm (lebih rendah 51,4–57,0% dari *single inverter* DTC-HBPWM dan hingga 95,07% dari V/F *single inverter*), torsi minimum selalu positif, serta fluktuasi daya mekanik turun hingga 96,0% dibanding V/F, sementara *dual inverter* pada V/F justru menghasilkan T_{pp} lebih besar dari *single inverter*-nya, membuktikan keunggulan *dual inverter* hanya terealisasi dengan kendali *closed-loop*. Namun demikian, pada beban nominal 26,71 Nm kedua konfigurasi DTC-HBPWM mengalami *loss of control* (pembalikan arah kecepatan, SSE lebih dari 480%, dan fluks kolaps hingga 11,2% dari referensi) akibat *integrator windup* karena

keterbatasan tegangan *DC-link*, sedangkan metode V/F tetap stabil pada beban yang sama (SSE 18,886%) karena tidak memiliki mekanisme integrator yang rentan mengalami *windup*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Kalimantan, atas dukungan fasilitas penelitian, serta kepada dosen pembimbing Andhika Giyantara, S.T., M.T. dan Riza Hadi Saputra, S.T., M.T. atas bimbingan yang diberikan selama penelitian tugas akhir ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kamal and S. Bandri, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Matlab Simulink," Rang Teknik Journal, vol. 6, no. 2, pp. 167–175, 2023.
- [2] A. Muis Prasetya and L. Sartika, "Mengatur Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Sliding Mode Control (SMC) dengan Field Oriented Control (FOC)," Jurnal Elektriكا Borneo (JEB), vol. 10, no. 2, pp. 58–63, 2024.
- [3] Q. Al Azze and I. A. R. Hameed, "Reducing torque ripple of induction motor control via direct torque control," International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 1379–1386, 2023.
- [4] H. H. Vo et al., "Pulse-width modulation direct torque control induction motor drive with Kalman filter," TELKOMNIKA, vol. 19, no. 1, pp. 277–284, 2021.
- [5] W. S. Mohammed, "A Comparison Study Between Hysteresis and Sinusoidal Pulse Width Modulation for Induction Motor Drive," vol. 4, pp. 39–46, 2025.
- [6] O. Allag et al., "Advanced Control Strategy for Induction Motors Using Dual SVM-PWM Inverters and MVT-Based Observer," Machines, vol. 13, no. 6, pp. 1–24, 2025.
- [7] G. Challa and M. D. Reddy, "Slip angle control based DTC of *open-end winding* induction motor drive using dual randomized decoupled PWM for acoustic noise mitigation in EV application," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 15, no. 3, pp. 1339–1347, 2024.
- [8] R. C. Prayogo, A. Triwiyatno, and M. A. Riyadi, "Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2622, no. 1, 2023.
- [9] D. H. Son and S. A. Kim, "Simplified V/f Control Algorithm for Reduction of Current Fluctuations in Variable-Speed Operation of Induction Motors," Energies, vol. 17, no. 7, 2024.