

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Garis Besar Penelitian

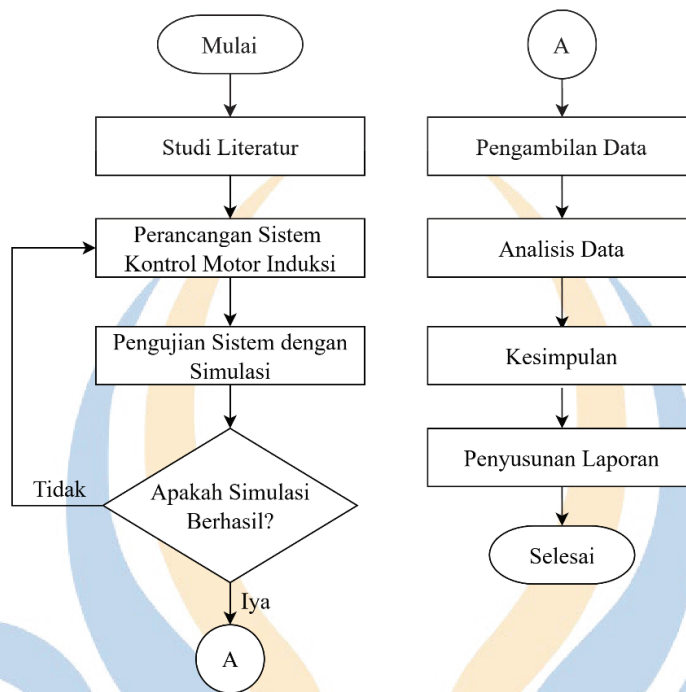
Penerapan penelitian dilakukan berdasarkan adanya kelemahan pada sistem *Direct Torque Control* (DTC) konvensional dengan konfigurasi *single inverter*, yaitu tingginya nilai *torque ripple* yang berpengaruh pada ketidakstabilan kecepatan motor induksi. Tujuan utama penelitian untuk meningkatkan performa pengendalian torsi dan fluks stator, memperbaiki kestabilan kecepatan rotor, serta meminimalkan *torque ripple*. Penerapan metode DTC yang dikombinasikan dengan *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) pada konfigurasi *dual Inverter* dapat memberikan kualitas pengendalian yang lebih baik dibandingkan dengan sistem *single inverter*. Untuk itu, penelitian tugas akhir berjudul “Analisis *Dual Inverter* dengan *Direct Torque Control* (DTC) dan *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) pada Pengendalian Motor Induksi”. Penelitian berbasis simulasi MATLAB/Simulink yang membandingkan kinerja sistem penggerak motor induksi tiga fasa pada sistem tanpa kendali dengan V/F, *single inverter* dengan kendali DTC–HBPWM dan *dual inverter* dengan kendali DTC–HBPWM. Kinerja kedua konfigurasi dianalisis berdasarkan parameter torsi elektromagnetik (termasuk *torque ripple*), kestabilan kecepatan rotor, respons transien, serta kualitas bentuk gelombang arus dan tegangan stator pada berbagai variasi torsi mekanik.

3.2 Diagram Alir

Diagram alir penelitian disusun agar peneliti dan pembaca dapat memahami secara sistematis berupa prosedur atau langkah-langkah dalam penelitian tugas akhir tersebut. Diagram alir pada penelitian tugas akhir ditunjukkan pada **Gambar**

3.1.

INSTITUT TEKNOLOGI
KALIMANTAN



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian terdiri atas beberapa tahapan sistematis yaitu studi literatur, perancangan sistem, pengujian sistem dengan simulasi, analisis data dan kesimpulan.

3.3.1 Studi Literatur

Tahapan studi literatur untuk memperoleh pemahaman teoritis serta informasi ilmiah yang relevan melalui kajian terhadap berbagai sumber seperti buku, jurnal ilmiah, artikel, dan penelitian sebelumnya dalam membantu menyelesaikan tugas akhir. Teori yang digunakan sebagai landasan untuk mendukung penelitian terdiri dari:

1. Motor Induksi
2. VSI
3. Transformasi Clarke
4. DTC
5. HBPWM
6. Respons Transien Sistem
7. Kontroler PI

Tahapan studi literatur akan terus diperbarui selama penelitian berlangsung untuk memperkuat dasar teori dan menunjang analisis hasil yang diperoleh.

3.3.2 Perancangan Sistem

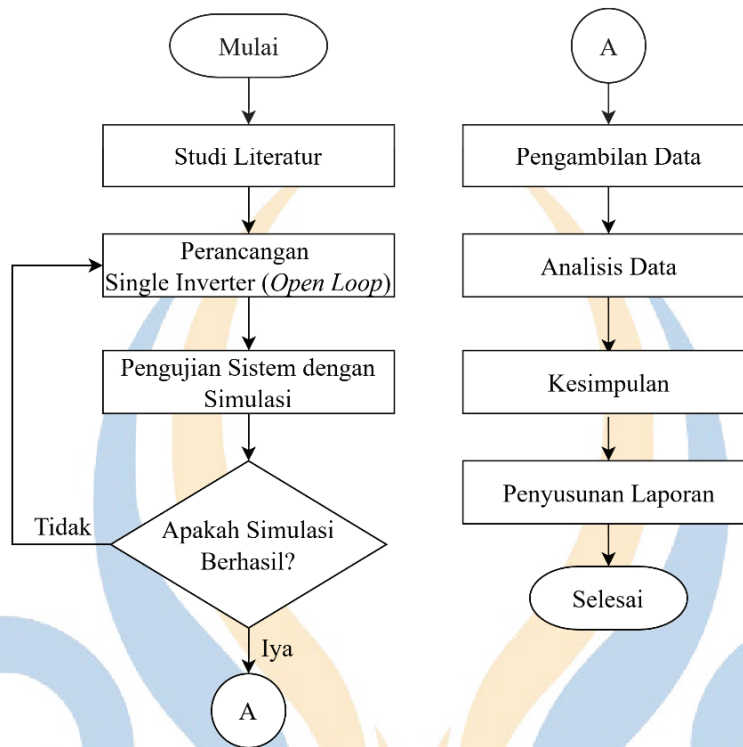
Perancangan sistem dilakukan untuk menjelaskan alur kerja sistem pengendalian yang diterapkan dalam penelitian. Perancangan sistem meliputi beberapa tahapan, yaitu penentuan parameter motor induksi, pemodelan Transformasi Clarke untuk memperoleh besaran pada koordinat stasioner, perancangan sistem kendali DTC, perancangan rangkaian *Voltage Source Inverter* (VSI) pada konfigurasi *single inverter* dan *dual inverter*, serta perancangan teknik pensaklaran HBPWM. Perancangan sistem menjadi dasar dalam pelaksanaan simulasi dan pengujian, baik pada sistem tanpa kendali dengan V/F maupun pada sistem dengan kendali DTC-HBPWM, serta digunakan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi *single inverter* dan *dual inverter* terhadap performa pengendalian motor induksi.

3.3.3 Pengujian dan Pengambilan Data Sistem

Pengujian dan pengambilan data sistem dilakukan setelah tahap perancangan dan pemodelan sistem selesai. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa pengendalian motor induksi tiga fasa pada berbagai metode pengendalian dan konfigurasi inverter. Skenario pengujian disusun secara bertahap, dimulai dari sistem tanpa kendali (V/F) sebagai *baseline*, kemudian dilanjutkan dengan sistem kendali berbasis DTC-HBPWM. Setiap skenario pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban mekanik untuk mengamati respons sistem terhadap perubahan kondisi operasi.

1. Pengujian dan Pengambilan Data Sistem V/F *Single Inverter* Tanpa Kendali

Pengujian sistem *single inverter* tanpa kendali dilakukan dengan menggunakan V/F sebagai pengujian dasar (*baseline*). Pada metode tersebut, perbandingan tegangan terhadap frekuensi dijaga tetap konstan untuk mempertahankan fluks stator, tanpa adanya umpan balik dari keluaran motor. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban mekanik.



Gambar 3.2 Diagram Alir Sistem *Single Inverter* Tanpa Kendali



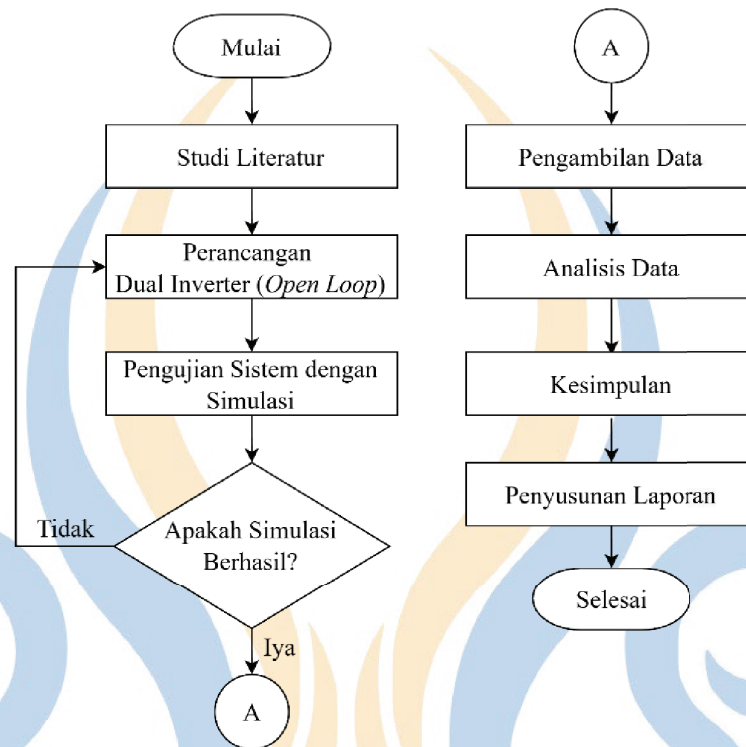
Gambar 3.3 Blok Diagram *Single Inverter* Tanpa Kendali

Pada pengujian tanpa beban, sistem diuji untuk mengamati karakteristik dasar motor induksi, seperti kecepatan rotor, torsi elektromagnetik, dan arus stator. Selanjutnya, pada pengujian dengan beban mekanik, torsi mekanik diberikan secara bertahap sebesar 5 Nm, 10 Nm, 15 Nm, 20 Nm, 25 Nm dan 26.71 Nm setelah sistem mencapai kondisi tunak. Parameter yang diamati meliputi kecepatan rotor, torsi elektromagnetik, arus stator, serta respons transien sistem. Hasil pengujian tersebut digunakan sebagai acuan awal dalam evaluasi performa sistem.

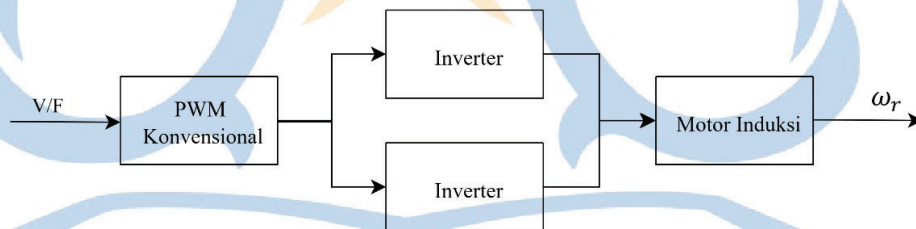
2. Pengujian dan Pengambilan Data Sistem V/F *Dual Inverter* Tanpa Kendali

Pengujian sistem *dual inverter* tanpa kendali dilakukan dengan prosedur yang serupa dengan sistem *single inverter*, namun menggunakan konfigurasi

dual inverter dengan *open-end winding*. Tegangan fasa stator diperoleh dari selisih tegangan keluaran kedua inverter.



Gambar 3.4 Diagram Alir Sistem *Dual Inverter* Tanpa Kendali

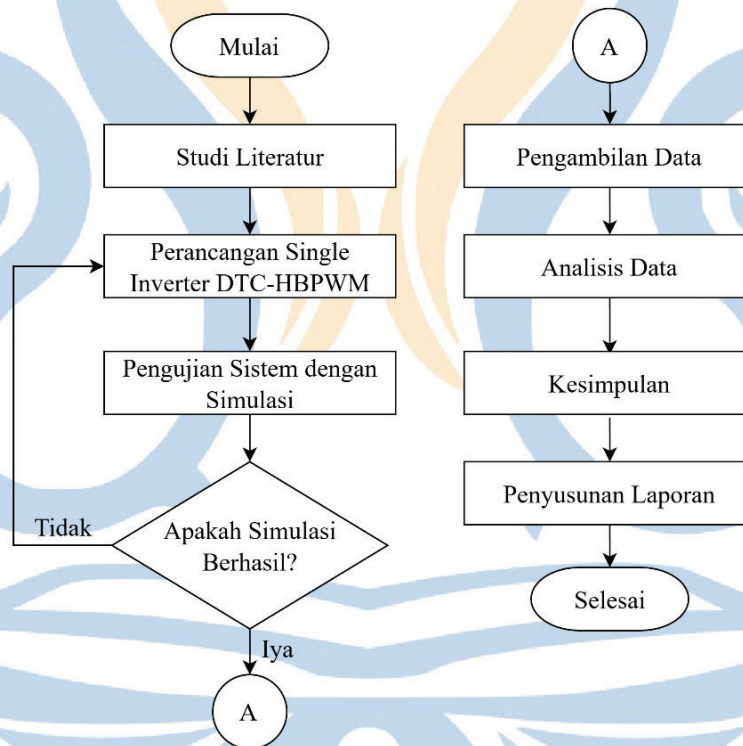


Gambar 3.5 Blok Diagram *Dual Inverter* Tanpa Kendali

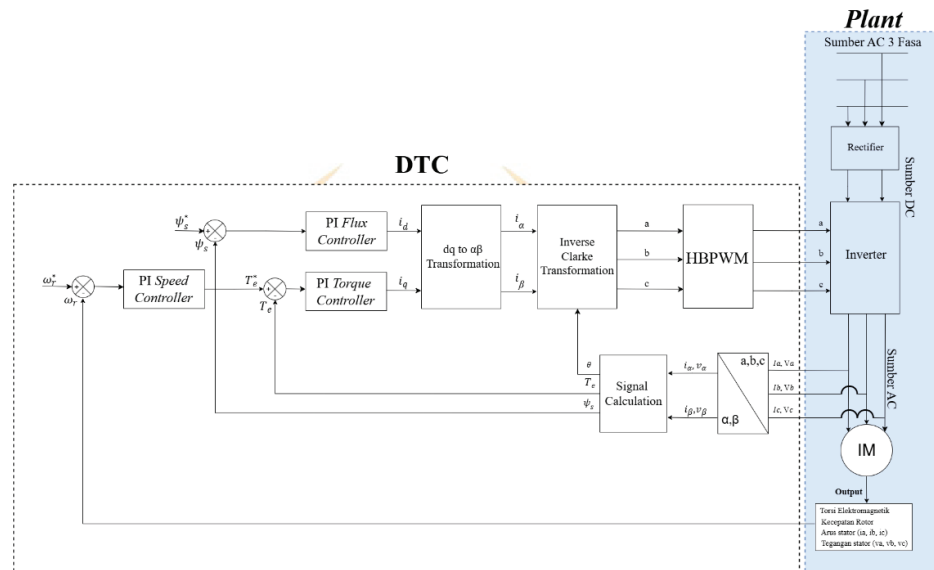
Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban mekanik. Pada kondisi berbeban, torsi mekanik diberikan secara bertahap sebesar 5 Nm, 10 Nm, 15 Nm, 20 Nm, 25 Nm dan 26.71 Nm setelah sistem mencapai kondisi tunak. Parameter yang diamati meliputi kecepatan rotor, torsi elektromagnetik, arus stator, serta kestabilan sistem. Hasil pengujian tersebut digunakan untuk membandingkan karakteristik sistem *dual inverter* terhadap sistem *single inverter* tanpa kendali.

3. Pengujian dan Pengambilan Data Sistem *Single Inverter* dengan Kendali DTC-HBPWM

Pada penelitian metode *Direct Torque Control* (DTC) digunakan untuk mengestimasi dan menghasilkan referensi torsi serta fluks stator. *Error* antara nilai referensi dan nilai aktual diproses menggunakan pengendali *Proportional-Integral* (PI) untuk menghasilkan arus referensi pada sumbu d dan q (i_d^* dan i_q^*). Arus referensi tersebut kemudian ditransformasikan ke koordinat $\alpha-\beta$ dan dilanjutkan ke sistem tiga fasa (abc) untuk menghasilkan arus referensi tiap fasa. Selanjutnya, teknik *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) digunakan untuk menghasilkan sinyal pensaklaran inverter dengan membandingkan arus referensi dan arus aktual motor.



Gambar 3.6 Diagram Alir Sistem *Single Inverter* DTC-HBPWM



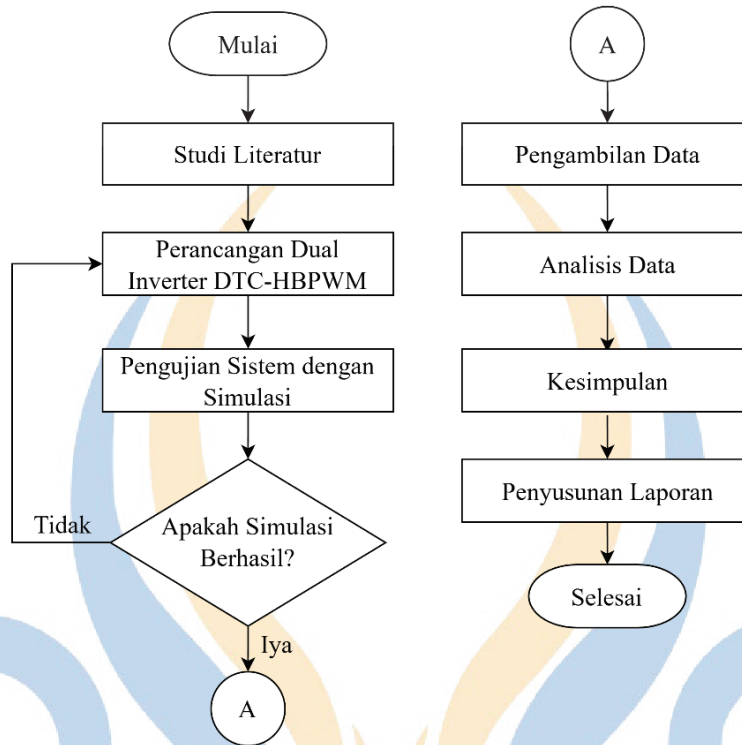
Gambar 3.7 Diagram Blok *Single Inverter* DTC-HBPWM

Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban mekanik. Pada pengujian berbeban, torsi referensi konstan diterapkan dan beban mekanik diberikan secara bertahap sebesar 5 Nm, 10 Nm, 15 Nm, 20 Nm, 25 Nm dan 26.71 Nm setelah sistem mencapai kondisi tunak. Parameter yang diamati meliputi torsi elektromagnetik beserta *torque ripple*, fluks stator, arus stator, tegangan stator, kecepatan rotor, dan respons transien sistem.

4. Pengujian dan Pengambilan Data Sistem *Dual Inverter* dengan Kendali DTC-HBPWM

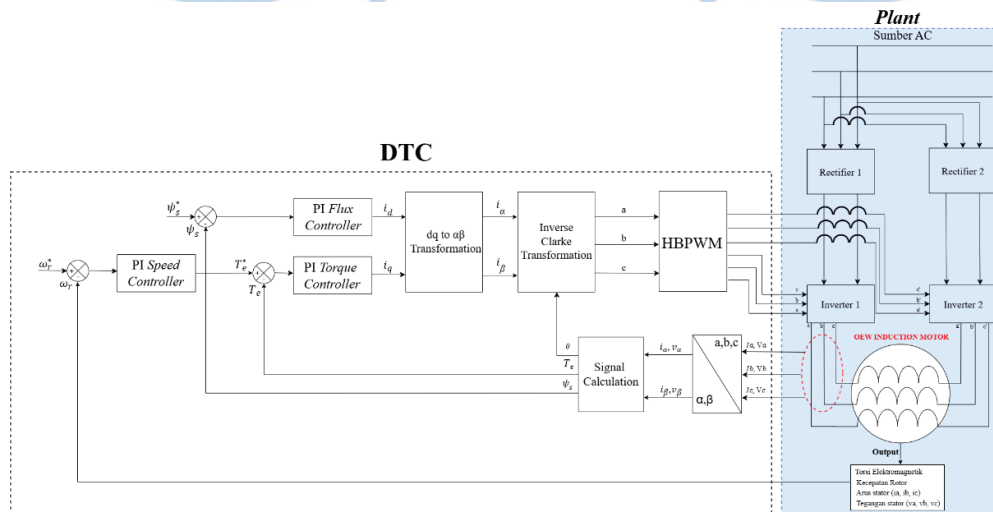
Pengujian sistem *dual inverter* dengan kendali DTC-HBPWM dilakukan dengan skenario yang sama seperti pada sistem *single inverter*. Perbedaan utama terletak pada penggunaan dua inverter yang terhubung ke motor induksi dengan konfigurasi *open-end winding*, sehingga tegangan yang diterapkan pada motor merupakan hasil selisih tegangan keluaran kedua inverter.

Nilai fluks stator dan torsi elektromagnetik dihitung secara *real-time* melalui blok *signal calculation* berdasarkan arus dan tegangan stator. *Error* antara nilai referensi dan nilai aktual diproses oleh pengendali *Proportional-Integral* (PI) pada blok fluks dan torsi untuk menghasilkan arus referensi pada sumbu d dan q (i_d^* dan i_q^*).



Gambar 3.8 Diagram Alir Sistem *Dual Inverter DTC-HBPWM*

Arus referensi tersebut kemudian ditransformasikan ke koordinat α - β dan dilanjutkan ke sistem tiga fasa (abc) untuk menghasilkan arus referensi tiap fasa. Selanjutnya, metode *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) digunakan untuk menghasilkan sinyal pensaklaran kedua inverter dengan membandingkan arus referensi dan arus aktual motor.



Gambar 3.9 Diagram Blok *Dual Inverter DTC-HBPWM*

Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban mekanik. Pada kondisi berbeban, beban mekanik diberikan secara bertahap sebesar 5 Nm, 10 Nm, 15 Nm, 20 Nm, 25 Nm dan 26.71 Nm setelah sistem mencapai kondisi tunak. Parameter yang diamati meliputi torsi elektromagnetik beserta *torque ripple*, fluks stator, arus stator, tegangan stator, kecepatan rotor, dan respons transien sistem.

3.3.4 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pengendalian motor induksi tiga fasa berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan. Analisis mencakup seluruh skenario pengujian yang telah ditetapkan, yaitu sistem tanpa kendali berbasis V/F sebagai pembanding dan sistem dengan kendali berbasis DTC–HBPWM sebagai metode utama. Setiap metode dianalisis pada konfigurasi *single inverter* dan *dual inverter*, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan variasi beban mekanik.

1. Analisis Sistem *Single Inverter* Tanpa Kendali dan dengan Kendali DTC–HBPWM

Analisis pada konfigurasi *single inverter* dilakukan untuk membandingkan performa sistem tanpa kendali dan sistem dengan kendali DTC–HBPWM. Pada sistem tanpa kendali, analisis difokuskan untuk mengamati kemampuan sistem dalam mempertahankan kecepatan dan torsi motor induksi pada kondisi tanpa beban dan saat diberikan beban mekanik. Perubahan kecepatan rotor, fluktuasi torsi, serta peningkatan arus stator akibat pembebanan dianalisis untuk menunjukkan keterbatasan sistem pengendalian terbuka. Pada metode DTC–HBPWM, analisis difokuskan pada kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan torsi dan fluks stator terhadap beban mekanik. Parameter yang dianalisis meliputi respons kecepatan rotor, torsi elektromagnetik beserta *torque ripple*, arus stator, serta respons transien sistem.

2. Analisis Sistem *Dual Inverter* Tanpa Kendali dan dengan Kendali DTC–HBPWM

Analisis pada konfigurasi *dual inverter* dilakukan dengan parameter dan skenario yang sama seperti pada sistem *single inverter* agar diperoleh perbandingan yang setara. Pada sistem tanpa kendali, analisis dilakukan untuk mengamati pengaruh penggunaan *dual inverter* dengan konfigurasi *open-end*

winding terhadap respons kecepatan, torsi elektromagnetik, arus stator, dan kestabilan sistem, baik pada kondisi tanpa beban maupun berbeban.

Pada metode DTC–HBPWM, analisis difokuskan pada pengaruh penggunaan *dual inverter* terhadap kualitas pengendalian motor induksi. Parameter yang dianalisis meliputi torsi elektromagnetik dan *torque ripple*, kestabilan fluks stator, bentuk gelombang arus dan tegangan stator, respons kecepatan rotor, serta respons transien akibat perubahan beban mekanik. Analisis digunakan untuk mengevaluasi peningkatan kualitas pengendalian yang diperoleh dari konfigurasi *dual inverter* dibandingkan *single inverter*.

3. Perbandingan Analisis Sistem *Single Inverter* dan *Dual Inverter* dengan Kendali DTC–HBPWM

Perbandingan kinerja antara sistem *single inverter* dan *dual inverter* dilakukan pada metode pengendalian DTC–HBPWM sebagai fokus utama penelitian. Perbandingan dilakukan berdasarkan parameter torsi elektromagnetik rata-rata, besarnya *torque ripple*, kestabilan fluks stator, respons kecepatan rotor, bentuk gelombang arus dan tegangan stator, serta karakteristik respons transien sistem terhadap variasi beban mekanik.

Analisis tersebut bertujuan untuk menilai sejauh mana konfigurasi *dual inverter* mampu meningkatkan kualitas pengendalian motor induksi tiga fasa dibandingkan dengan *single inverter*, khususnya dalam menghadapi kondisi berbeban dan perubahan torsi secara dinamis.

3.3.5 Kesimpulan

Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian, pengambilan data, dan analisis yang telah dilakukan pada seluruh skenario pengujian yang direncanakan. Pengujian mencakup konfigurasi *single inverter* dan *dual inverter* dengan V/F sebagai sistem tanpa kendali (pembanding) serta metode DTC–HBPWM sebagai sistem kendali utama, yang diuji pada kondisi tanpa beban dan dengan variasi beban mekanik.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan, dapat dievaluasi bahwa sistem tanpa kendali sebagai sistem pengendalian terbuka memiliki keterbatasan dalam mempertahankan kestabilan kecepatan dan torsi motor induksi, khususnya saat terjadi perubahan beban mekanik. Respons transien yang relatif

lambat serta fluktuasi torsi yang lebih besar menunjukkan perlunya metode pengendalian lanjutan untuk aplikasi dengan kondisi operasi dinamis.

Penerapan metode DTC–HBPWM difokuskan pada kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan torsi dan kecepatan rotor, mengurangi *torque ripple*, serta memperbaiki respons transien terhadap perubahan beban mekanik. Selain itu, penggunaan konfigurasi *dual inverter* dengan *open-end winding* dianalisis untuk menilai pengaruhnya terhadap kualitas pengendalian dibandingkan dengan konfigurasi *single inverter*. Evaluasi dilakukan berdasarkan respons kecepatan rotor, karakteristik torsi elektromagnetik, kestabilan fluks stator, serta bentuk gelombang arus dan tegangan stator. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar untuk menilai sejauh mana konfigurasi *dual inverter* mampu memberikan peningkatan performa pengendalian pada motor induksi tiga fasa.

3.4 Penentuan Parameter Motor

Parameter motor yang digunakan dalam perancangan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

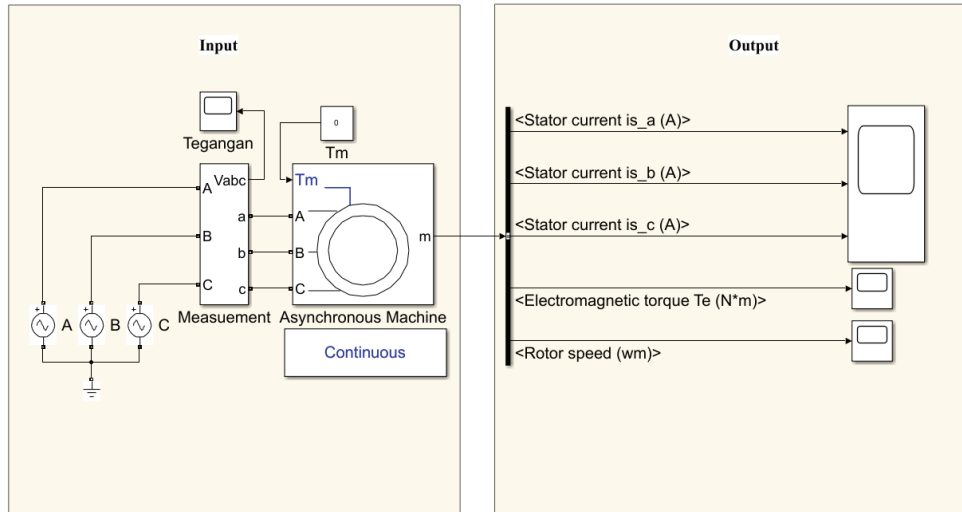
Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi 3 Fasa

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan Rating	V_{LL}	400	V
Kecepatan Rating	n	1430	RPM
Frekuensi	F	50	Hz
Induktansi Bocor Rotor	L_{lr}	0.005839	H
Induktansi Bocor Stator	L_{ls}	0.005839	H
Induktansi Total Rotor	L_r	0,177939	H
Induktansi Total Stator	L_s	0,178039	H
Induktansi	L_m	0.1722	H
Momen Inersia Motor	J	0.0131	kg·m ²
Jumlah Pole	N_p	4	-
Koefisien Gesek	B	0.002985	N·m·s
Resistansi Rotor	R_r	1.395	Ω
Resistansi Stator	R_s	1.405	Ω

3.5 Perancangan Pengendalian Langsung

Perancangan pengendalian langsung dilakukan untuk mengamati respons yang dihasilkan oleh motor induksi. Pada pengujian tersebut, motor induksi

dihubungkan secara langsung ke sumber tegangan tiga fasa sinusoidal sebagai *input*. Tegangan *line-to-line* tiga fasa yang digunakan memiliki nilai RMS sebesar 400 V dengan frekuensi 50 Hz. **Gambar 3.10** menunjukkan blok diagram sistem kontrol langsung yang digunakan dalam simulasi..



Gambar 3.10 Pemodelan Pengendalian Langsung

Nilai tegangan tersebut kemudian dikonversi menjadi tegangan per fasa menggunakan **Persamaan (3.1)**.

$$V_{peak} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{(V_{LL,rms})\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{(400)\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 325.27 \text{ Volt} \quad (3.1)$$

Nilai tegangan per fasa yang diperoleh berdasarkan **Persamaan (3.1)** adalah sebesar 325,27 Volt. Tegangan tersebut berfungsi sebagai sumber untuk masing-masing fasa pada motor induksi. Pada pemodelan tersebut, dilakukan pengamatan terhadap arus stator tiga fasa (abc), torsi elektromagnetik, serta kecepatan rotor.

3.6 Perancangan Pengendalian V/F Konvensional

Perancangan pengendalian *Voltage per Frequency* (V/F) pada penelitian ini diterapkan sebagai sistem pembanding (*baseline*) terhadap metode *Direct Torque Control* berbasis *Hybrid Pulse Width Modulation* (DTC-HBPWM) yang diusulkan. Pengendalian V/F dipilih karena merupakan metode kendali skalar yang sederhana, mudah diimplementasikan, dan banyak digunakan pada aplikasi industri untuk mengatur kecepatan motor induksi. Prinsip dasar pengendalian ini adalah mempertahankan rasio antara tegangan stator dan frekuensi sumber tetap konstan ($V_s/f = \text{konstan}$) sehingga fluks magnet pada celah udara motor tetap berada di sekitar nilai nominal selama perubahan kecepatan. Dengan fluks yang relatif

konstan, motor induksi mampu menghasilkan karakteristik torsi yang stabil pada berbagai kondisi operasi.

Pada penelitian ini, pengendalian V/F diimplementasikan pada dua konfigurasi inverter, yaitu *single inverter* dan *dual inverter*, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.11** dan **Gambar 3.12**. Kedua konfigurasi dirancang menggunakan parameter motor yang sama sehingga perbedaan performa yang diperoleh berasal dari konfigurasi inverter yang digunakan. Sistem memperoleh sumber daya dari *DC-Link* sebesar 562,9 V, yang merupakan hasil penyearahan tegangan tiga fasa 400 V dan digunakan sebagai sumber tegangan masukan inverter *Voltage Source Inverter* (VSI) dua level.

Perancangan dimulai dengan menentukan frekuensi referensi (f_{ref}) sebesar 47,5 Hz. Berdasarkan karakteristik V/F konstan, besar tegangan referensi stator dihitung menggunakan rasio tegangan dan frekuensi nominal motor. Motor induksi yang digunakan memiliki tegangan nominal sebesar 400 V dan frekuensi nominal 50 Hz, sehingga rasio V/F nominal dapat dihitung pada **Persamaan (3.2)**.

$$\frac{V_s}{f} = \frac{400}{50} = 8 \text{ V/Hz} \quad (3.2)$$

Dengan frekuensi referensi sebesar 47,5 Hz, maka tegangan referensi stator yang dibangkitkan pada **Persamaan (3.3)**.

$$V_s = 8 \times 47,5 = 380 \text{ V} \quad (3.3)$$

Tegangan referensi tersebut selanjutnya digunakan sebagai amplitudo sinyal referensi tiga fasa yang dibangkitkan dengan pergeseran sudut sebesar 120° antar fasa sesuai **Persamaan (2.20)–(2.22)**. Ketiga sinyal referensi tersebut kemudian dibandingkan dengan sinyal pembawa (*carrier*) berbentuk gelombang segitiga menggunakan teknik *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) untuk menghasilkan sinyal pensaklaran inverter. Pulsa hasil modulasi SPWM digunakan untuk mengendalikan saklar IGBT pada inverter sehingga menghasilkan tegangan AC tiga fasa dengan amplitudo dan frekuensi yang sesuai dengan nilai referensi.

Pada konfigurasi *single inverter*, tegangan keluaran motor dihasilkan oleh satu buah inverter VSI dua level yang secara langsung menyuplai stator motor induksi. Sementara itu, pada konfigurasi *dual inverter*, digunakan dua inverter VSI dua level yang dihubungkan pada kedua sisi belitan stator. Tegangan yang diterima motor merupakan hasil selisih antara tegangan keluaran inverter pertama dan

inverter kedua. Konfigurasi *dual inverter* menghasilkan jumlah level tegangan keluaran yang lebih banyak dibandingkan konfigurasi *single inverter* sehingga bentuk gelombang tegangan menjadi lebih halus, kandungan harmonisa berkurang, dan riak torsi (*torque ripple*) dapat ditekan.

Kedua konfigurasi pengendalian V/F yang dirancang pada penelitian ini bekerja dalam mode *open-loop*, yaitu tanpa menggunakan umpan balik kecepatan, fluks, maupun torsi. Oleh karena itu, perubahan beban akan memengaruhi kecepatan rotor tanpa adanya mekanisme koreksi secara otomatis. Meskipun demikian, metode V/F tetap dipilih sebagai sistem pembanding karena mampu memberikan karakteristik pengendalian kecepatan yang sederhana dan representatif terhadap metode kendali skalar konvensional.

3.7 Perancangan *Direct Torque Control* (DTC)

Pada **Gambar 3.13** menunjukkan rancangan sistem *Direct Torque Control* (DTC) pada pengendalian motor induksi tiga fasa. Sistem tersebut dirancang untuk mengendalikan torsi elektromagnetik dan fluks stator secara langsung berdasarkan sinyal arus dan tegangan stator yang terukur. Sinyal tegangan dan arus tiga fasa stator diproses pada blok *Flux and Torque Estimator* untuk mengestimasi fluks stator dan torsi elektromagnetik pada koordinat alfa-beta. Hasil estimasi tersebut bersama kecepatan aktual motor digunakan sebagai masukan pada blok *Controller* untuk menghasilkan arus referensi sumbu-d dan sumbu-q sebagai pengendali fluks dan torsi motor induksi. Arus referensi kemudian dikonversi dari koordinat dq ke alfa-beta menggunakan transformasi invers park, lalu diubah menjadi arus referensi tiga fasa melalui transformasi invers clarke. Arus referensi tiga fasa tersebut digunakan sebagai sinyal acuan pada sistem pensaklaran inverter untuk menghasilkan tegangan keluaran inverter sesuai kebutuhan pengendalian motor induksi.

Blok *Flux and Torque Estimator* menerima dua masukan, yaitu tegangan tiga fasa stator terukur (V_{abc}) dan arus tiga fasa stator terukur (I_{abc}). Langkah pertama dalam blok ini adalah menghitung tegangan stator efektif secara *real-time*. Tegangan keluaran inverter berbentuk sinyal pulsa akibat proses pensaklaran IGBT sinyal tersebut bukan sinyal kontinu, melainkan hasil modulasi dari tegangan *DC-Link* sesuai dengan sinyal pensaklaran (S1 hingga S6). Blok *Signal Calculation* berfungsi mengonversi sinyal-sinyal pensaklaran tersebut menjadi tegangan stator

efektif pada koordinat alfa-beta (V_α, V_β), dengan mempertimbangkan kondisi saklar yang aktif pada setiap waktu. Tegangan efektif tersebut kemudian diintegrasikan bersama arus stator terukur untuk mengestimasi fluks stator menggunakan model tegangan stator motor induksi, sesuai **Persamaan (2.36)**, dengan R_s serta V_α , dan V_β , adalah tegangan stator efektif pada koordinat alfa-beta hasil keluaran blok *Signal Calculation*. Resistansi R_s dikurangkan dari tegangan untuk mengoreksi rugi tegangan akibat resistansi belitan, sehingga hasil integrasi mencerminkan fluks yang sebenarnya terbentuk pada celah udara motor. Dari komponen fluks ψ_α dan ψ_β tersebut, magnitudo fluks stator dihitung melalui **Persamaan (2.28)**. Dengan cara yang serupa, torsi elektromagnetik diestimasi langsung dari interaksi fluks dan arus stator sesuai **Persamaan (2.29)**, dengan p adalah jumlah pasang kutub motor ($p = 2$), serta i_α dan i_β adalah komponen arus stator pada koordinat alfa-beta yang diperoleh dari transformasi clarke terhadap arus tiga fasa terukur. Blok *Flux and Torque Estimator* menghasilkan empat keluaran, yaitu estimasi magnitudo fluks stato, estimasi torsi elektromagnetik, serta komponen fluks pada masing-masing sumbu alfa dan beta.

Keempat sinyal tersebut bersama kecepatan aktual motor (Kecepatan) diteruskan sebagai masukan pada blok *Controller*. Di dalam blok *Controller* berlangsung dua *loop* kendali PI secara paralel. Pertama, *loop* kendali fluks membandingkan nilai fluks terukur (ψ_{est}) terhadap nilai referensi fluks stator yang ditetapkan konstan. Selisih *error* tersebut diproses oleh pengendali PI fluks untuk menghasilkan arus referensi sumbu-d (i_d^*). Fluks yang dijaga konstan memastikan bahwa torsi yang dihasilkan motor murni merupakan fungsi dari arus, tanpa terganggu oleh fluktuasi fluks kondisi inilah yang membuat respons torsi DTC jauh lebih cepat dibandingkan metode V/F konvensional. Kedua, *loop* kendali kecepatan membandingkan kecepatan aktual motor terhadap kecepatan referensi, setara dengan kecepatan rating. Selisih *error* kecepatan diproses oleh pengendali PI kecepatan untuk menghasilkan referensi torsi, yang selanjutnya dikonversi menjadi arus referensi sumbu-q (i_q^*). Dengan menjaga ψ_{ref} konstan, pengendalian torsi secara langsung menjadi pengendalian arus i_q secara langsung. Selain menghasilkan i_d^* dan i_q^* , blok *Controller* juga menghasilkan sudut fluks (theta) yang diperoleh dari komponen PhiAlpha dan PhiBeta.

Pemilihan nilai $\psi_{ref} = 0,8$ Wb sebagai referensi fluks stator didasarkan pada hubungan antara fluks stator dengan induktansi magnetisasi motor dan arus komponen sumbu-d. Fluks stator referensi dihitung dari Persamaan (3.4).

$$\psi_{ref} = L_m \times I_{d,nominal} \quad (3.4)$$

dengan L_m adalah induktansi magnetisasi motor sesuai **Tabel 3.1** dan $I_{d,nominal}$ adalah arus komponen sumbu-d pada kondisi operasi nominal. Nilai $\psi_{ref} = 0,8$ Wb dipilih agar fluks stator dipertahankan pada nilai yang cukup untuk menghasilkan torsi elektromagnetik maksimum sesuai kapasitas motor, sekaligus menghindari saturasi inti besi stator. Dengan menjaga ψ_{ref} konstan, komponen fluks motor sepenuhnya ditentukan oleh arus sumbu-d (i_d), sementara torsi elektromagnetik sepenuhnya ditentukan oleh arus sumbu-q (i_q) kondisi ini menghasilkan *decoupling* (pemisahan kendali) antara fluks dan torsi secara alami, yang menjadi keunggulan utama struktur DTC dibandingkan metode V/F konvensional (Ibrahim and Alsammak, 2023). Pemilihan nilai $\omega_{ref} = 149,75$ rad/s didasarkan pada kecepatan rating motor 1430 rpm yang dikonversi ke satuan radian per detik menggunakan **Persamaan (2.3)**. Selisih *error* antara ω_{ref} dan kecepatan aktual rotor diproses oleh pengendali PI kecepatan untuk menghasilkan referensi torsi elektromagnetik (T_{em}^*). Mekanisme ini didasarkan pada **Persamaan (2.6)** selisih antara torsi elektromagnetik dan torsi beban ($T_e - T_L$) menentukan laju perubahan kecepatan rotor, sehingga untuk mengatur kecepatan harus melalui kendali torsi, bukan langsung melalui kendali tegangan seperti pada metode V/F konvensional.

Selanjutnya, sinyal i_d^*, i_q^* , dan theta diproses pada blok *dq to alfa beta* untuk melakukan transformasi invers park, menghasilkan komponen arus referensi pada koordinat stasioner alfa-beta (I_{alpha} dan I_{beta}). Kedua komponen tersebut kemudian diproses pada blok *Inverse Clarke Transform* untuk menghasilkan arus referensi tiga fasa, yaitu (i_a^*, i_b^*, i_c^*). Ketiga sinyal arus referensi tiga fasa inilah yang menjadi sinyal acuan pada sistem pensaklaran HBPWM dalam menentukan pola pensaklaran inverter.

3.8 Perancangan Single Inverter DTC-HBPWM

Pada **Gambar 3.14** menunjukkan rancangan sistem *single inverter* DTC-HBPWM yang digunakan pada pengendalian motor induksi tiga fasa. Konfigurasi

tersebut menggunakan satu inverter dua level tiga fasa yang dihubungkan ke sisi lilitan stator motor induksi. Sistem ini menggabungkan metode *Direct Torque Control* (DTC) sebagai strategi pengendalian torsi dan fluks, serta *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) sebagai metode pensaklaran inverter.

Diagram alir sistem *single inverter* DTC-HBPWM ditunjukkan pada **Gambar 3.6**, sedangkan diagram blok keseluruhan sistem ditunjukkan pada **Gambar 3.7**. Secara umum, sistem terdiri atas empat bagian utama, yaitu blok *Flux and Torque Estimator*, blok *controller*, blok transformasi koordinat (dq to alfa beta dan *Inverse Clarke Transform*), serta blok *single inverter* dengan metode pensaklaran HBPWM.

Sinyal tegangan tiga fasa stator terukur (V_{abc}) dan arus tiga fasa stator terukur (I_{abc}) diproses pada blok *Flux and Torque Estimator* untuk mengestimasi fluks stator dan torsi elektromagnetik secara *real-time*. Hasil estimasi tersebut berupa empat sinyal keluaran, yaitu estimasi magnitudo fluks stator, estimasi torsi elektromagnetik, serta komponen fluks pada sumbu alfa dan beta. Keempat sinyal tersebut bersama kecepatan aktual motor diteruskan sebagai masukan pada blok *Controller* untuk diproses melalui dua *loop* kendali PI secara paralel, yaitu *loop* kendali fluks dan *loop* kendali kecepatan, sehingga menghasilkan arus referensi sumbu-d (i_d^*), arus referensi sumbu-q (i_q^*), dan sudut fluks (θ).

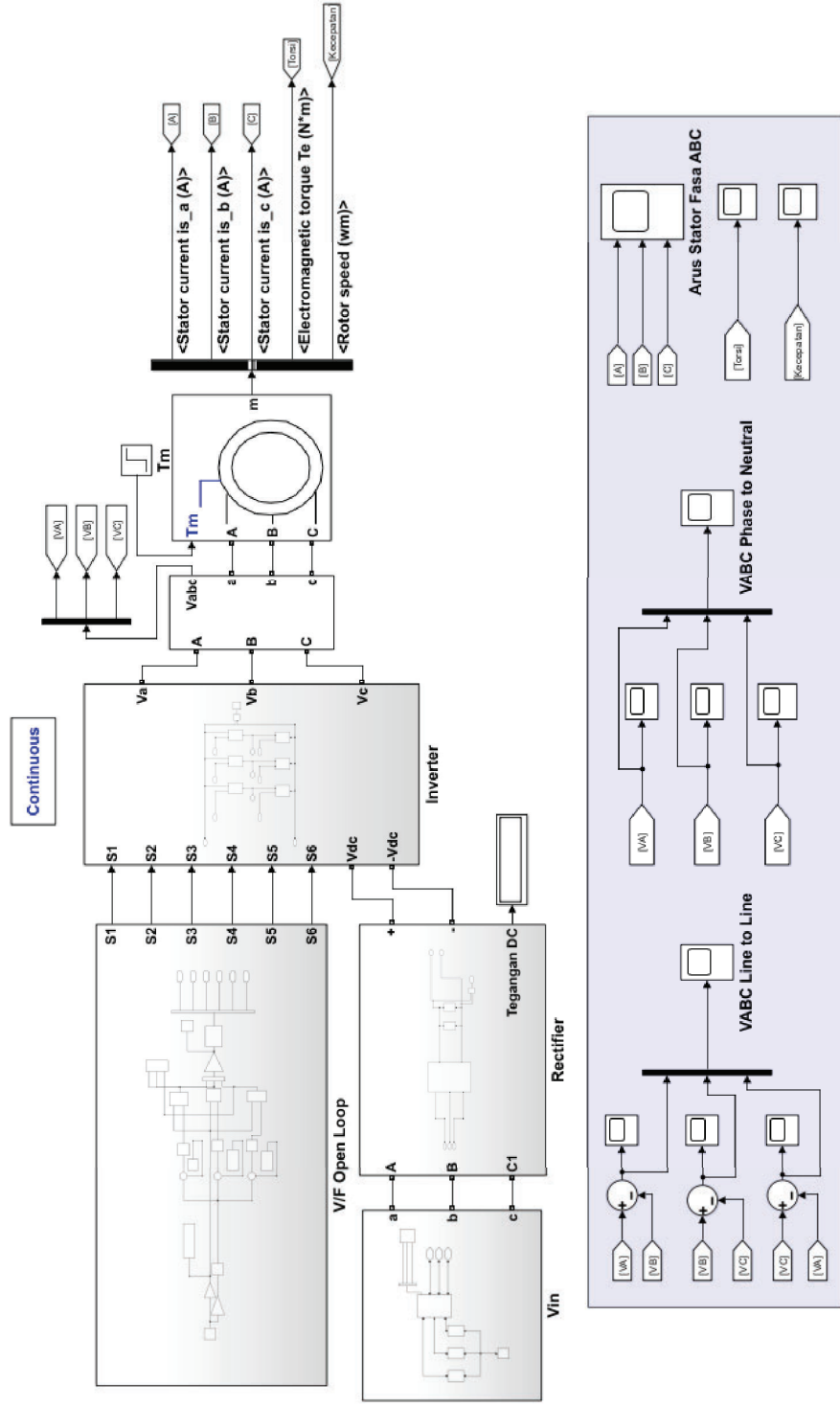
Arus referensi i_d^* , i_q^* dan sudut fluks θ selanjutnya diproses pada blok dq to alfa beta melalui transformasi invers park untuk menghasilkan komponen arus referensi pada koordinat stasioner alfa-beta. Kedua komponen tersebut kemudian diubah menjadi arus referensi tiga fasa (i_a^*, i_b^*, i_c^*) melalui blok *Inverse Clarke Transform*. Arus referensi tiga fasa tersebut selanjutnya digunakan sebagai sinyal acuan pada blok HBPWM. Pada blok HBPWM, arus referensi dibandingkan secara langsung dengan arus aktual motor. Selisih antara arus referensi dan arus aktual dikendalikan dalam batas *Hysteresis Band* (HB) sebesar 0,25 A, untuk menghasilkan sinyal pensaklaran bagi keenam saklar IGBT pada inverter. Sinyal pensaklaran yang dihasilkan mengendalikan saklar atas (S1, S3, S5) dan saklar bawah (S2, S4, S6) secara komplementer pada setiap inverter, sehingga inverter menghasilkan tegangan keluaran tiga fasa yang digunakan untuk menggerakkan motor induksi. Inverter disuplai oleh tegangan DC sebesar 562,9 Volt yang merupakan nilai puncak dari tegangan nominal motor.

3.9 Perancangan *Dual Inverter Open-End Winding* DTC-HBPWM

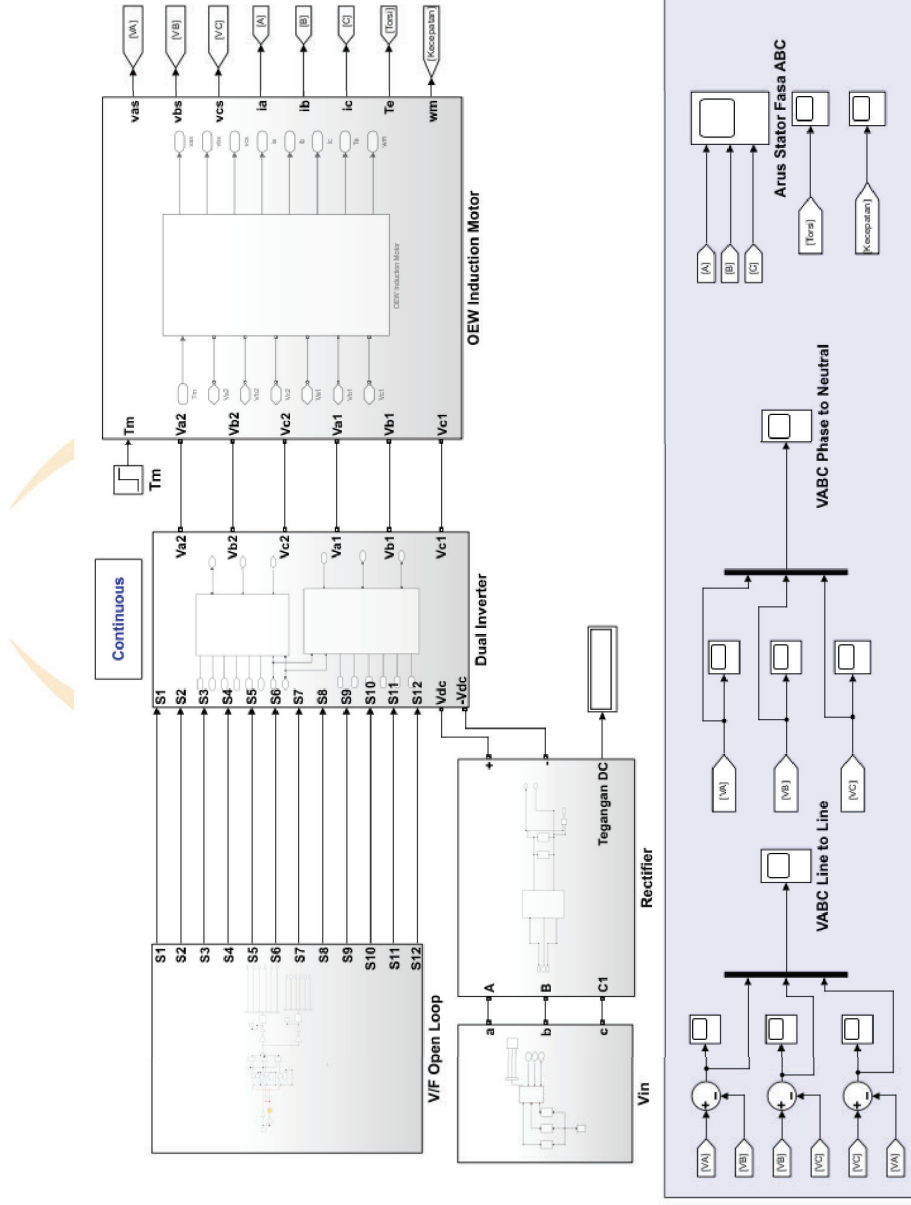
Pada **Gambar 3.15** menunjukkan rancangan sistem *Dual Inverter Open-End Winding* yang digunakan pada pengendalian motor induksi tiga fasa. Konfigurasi tersebut menggunakan dua inverter dua level yang dihubungkan pada kedua sisi lilitan stator motor induksi tipe *open-end winding* sehingga setiap fasa motor dikendalikan oleh dua sumber tegangan inverter secara terkoordinasi pada kedua sisi lilitan stator.

Sinyal arus referensi (i_a^* , i_b^* , i_c^*) dan arus aktual motor digunakan sebagai masukan pada blok *Dual* HBPWM untuk menghasilkan sinyal pensaklaran inverter. Metode *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) bekerja dengan membandingkan arus referensi dan arus aktual menggunakan pita histeresis sehingga inverter dapat menghasilkan arus keluaran yang mengikuti nilai referensi secara langsung. Sumber tegangan DC inverter diperoleh dari blok *rectifier* yang berfungsi mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC sebagai catu daya kedua inverter. Tegangan DC tersebut kemudian digunakan oleh blok *dual inverter* untuk menghasilkan tegangan keluaran tiga fasa pada masing-masing sisi lilitan stator motor induksi.

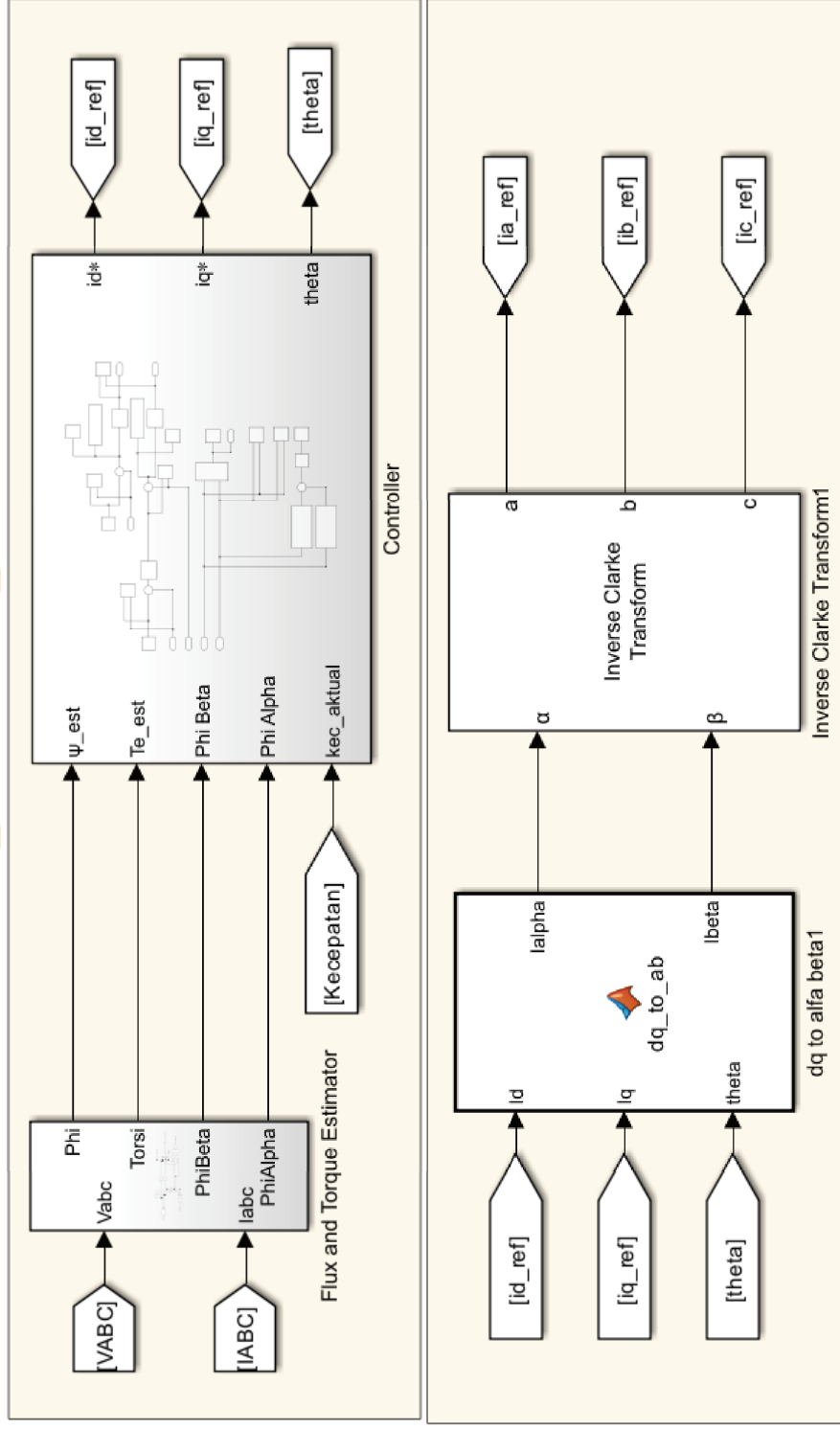
Konfigurasi *dual inverter open-end winding* menghasilkan variasi tegangan yang lebih banyak dibandingkan sistem *single inverter*, sehingga resolusi tegangan keluaran menjadi lebih halus dan pengendalian arus, fluks, serta torsi motor induksi dapat dilakukan dengan lebih presisi. Keluaran sistem menghasilkan parameter berupa tegangan stator, arus stator, torsi elektromagnetik, dan kecepatan rotor yang dianalisis untuk mengevaluasi performa pengendalian. Secara keseluruhan, konfigurasi tersebut terbukti mampu mengurangi *ripple* arus dan *ripple* torsi dibandingkan konfigurasi *single inverter*.



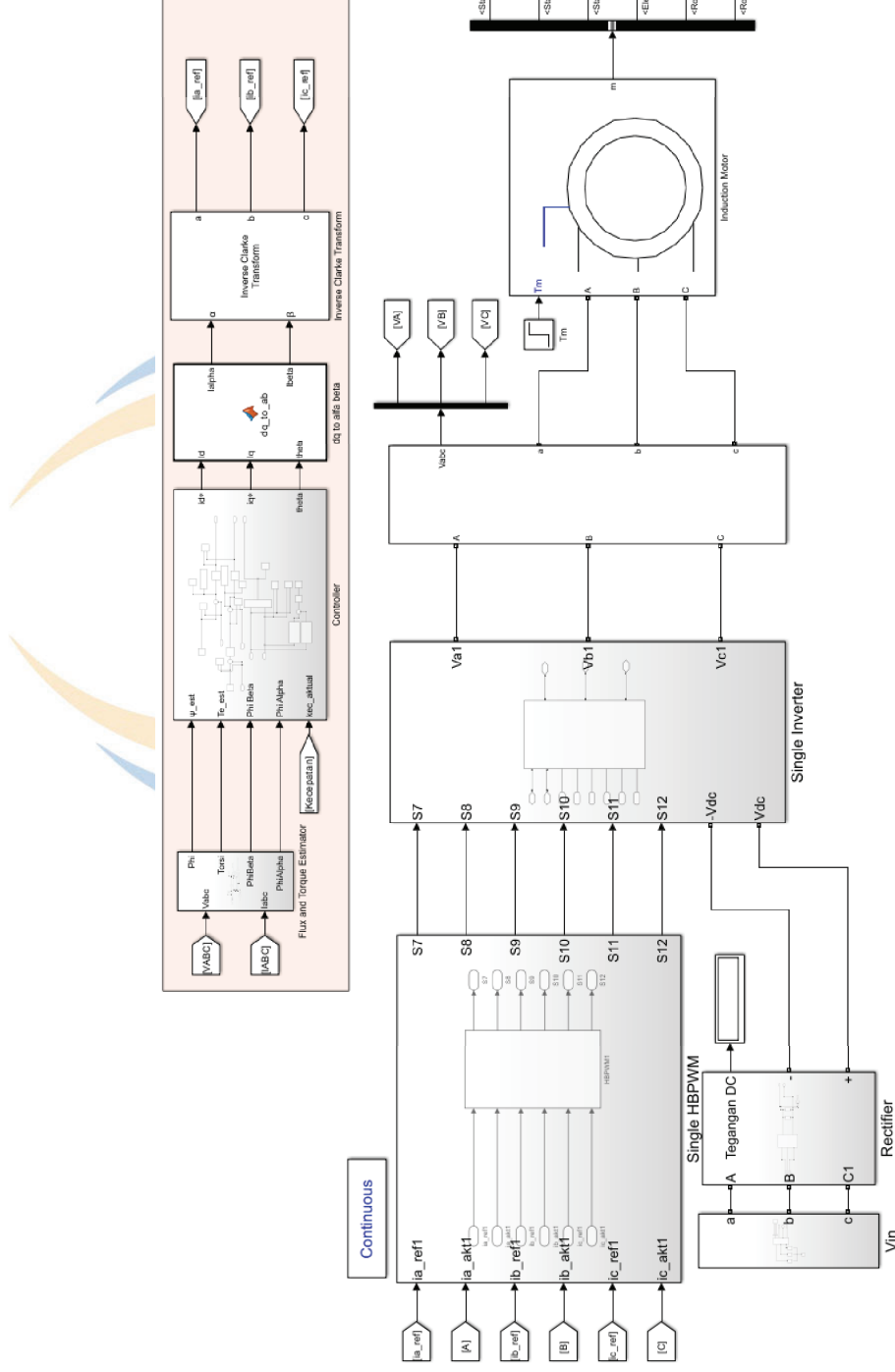
Gambar 3.11 Perancangan V/F Single Inverter



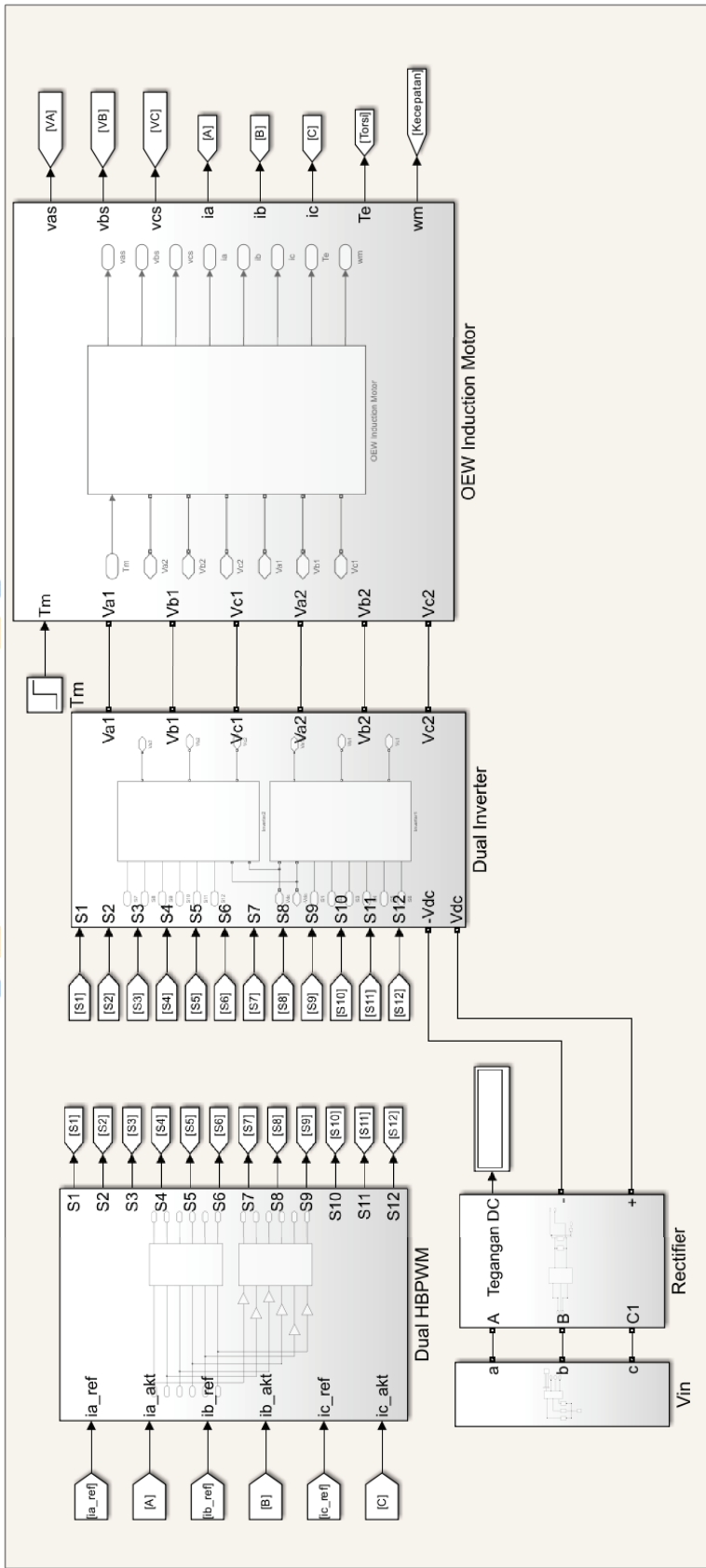
Gambar 3.12 Perancangan V/F Dual Inverter



Gambar 3.13 Perancangan DTC



Gambar 3.14 Perancangan Single Inverter DTC-HBPWM

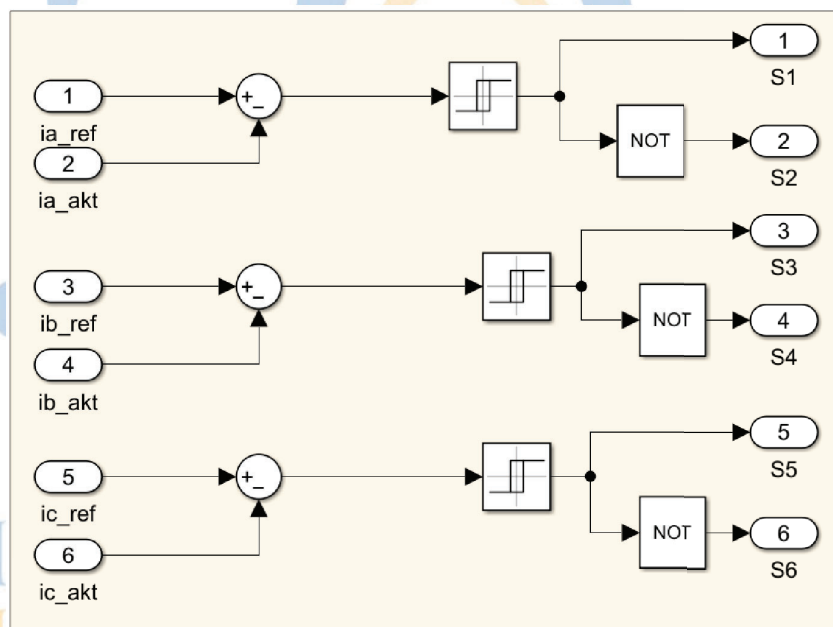


Gambar 3.15 Perancangan Dual Inverter Open-End Winding

3.10 Perancangan Hysteresis Band Pulse Width Modulation (HBPWM)

Perancangan HBPWM bertujuan untuk mengatur pensaklaran gerbang (*gate switching*) pada inverter guna menghasilkan tegangan AC tiga fasa yang akan disuplai ke motor induksi tiga fasa. Prinsip kerja dari metode *Hysteresis Band Pulse Width Modulation* (HBPWM) adalah membandingkan antara arus stator referensi dengan arus stator aktual yang dihasilkan oleh motor induksi, sehingga arus stator aktual dapat mengikuti nilai referensi yang diberikan. Selisih antara arus referensi dan arus aktual menghasilkan sinyal *error*, yang kemudian dikendalikan dalam batas *Hysteresis Band* (HB). Nilai HB umumnya berada dalam kisaran 5% hingga 10% dari arus sistem (Abedi dan Vahedi, 2013). Desain pemodelan metode HBPWM yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.13**. Dalam penelitian yang dilakukan, nilai *Hysteresis Band* (HB) ditetapkan sebesar 6% dari arus stator motor induksi. Nilai arus stator tersebut diperoleh dari hasil simulasi pada kondisi *steady-state*, yaitu sebesar $I = 4,11$ A. Berdasarkan nilai tersebut, maka nilai *Hysteresis Band* dapat dihitung dengan **Persamaan (3.2)**.

$$HB = 0,06 \times 4,11 \approx 0,2466 \approx 0,25 \text{ A} \quad (3.5)$$



Gambar 3.16 Perancangan HBPWM

Setelah diperolehnya nilai HB (*Hysteresis Band*) dari perhitungan pada **Persamaan (3.2)** yang digunakan untuk menentukan batas atas (*upper band*) dan

batas bawah (*lower band*) *Hysteresis Band* (HB), sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan (3.3) dan (3.4)**

$$Upper\ Band \approx 0.25 \quad (3.6)$$

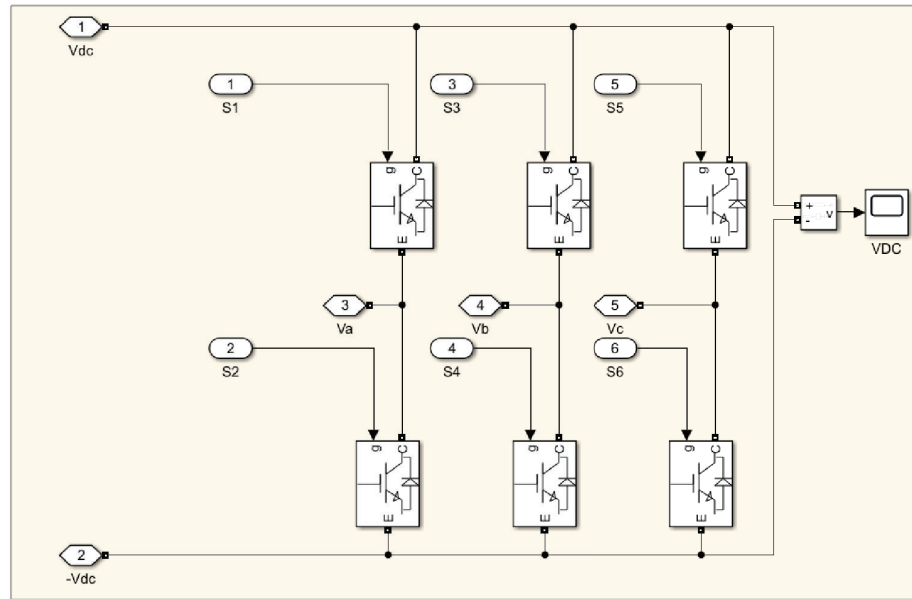
$$Lower\ Band \approx 0.25 \quad (3.7)$$

Ketika arus referensi mencapai batas atas (*upper band*) dari *Hysteresis Band* (HB), sinyal logika '1' dikirimkan ke gerbang (*gate*) inverter, sehingga saklar inverter menjadi aktif. Sebaliknya, ketika arus referensi mencapai batas bawah (*lower band*) dari HB, sinyal logika '0' dikirimkan ke gerbang inverter, yang menyebabkan saklar inverter menjadi tidak aktif. Keluaran dari blok *relay* tersebut berupa sinyal pulsa PWM yang kemudian diteruskan ke gerbang inverter. Setiap fasa dilengkapi dengan satu *relay* dan satu blok logika NOT, sinyal keluaran relay digunakan untuk mengendalikan saklar atas (S1, S3, S5), sedangkan sinyal hasil inversi (NOT) digunakan untuk mengendalikan saklar bawah (S2, S4, S6). Mekanisme tersebut sejalan dengan prinsip kerja inverter, yaitu dua saklar dalam satu lengan inverter tidak boleh berada dalam kondisi aktif secara bersamaan untuk mencegah hubung singkat.

3.11 Perancangan *Voltage Source Inverter* (VSI)

Inverter yang digunakan dalam sistem pengendalian motor induksi adalah inverter sumber tegangan dua level VSI karena memiliki struktur yang sederhana dan relatif mudah dikendalikan. Inverter VSI dua level terdiri atas tiga lengan (*legs*) dan enam saklar, di mana setiap lengan memiliki dua saklar yang beroperasi secara komplementer (tidak aktif secara bersamaan). Saklar yang digunakan pada pemodelan inverter tersebut adalah *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). IGBT banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan tegangan dan daya menengah hingga tinggi, umumnya pada tegangan di atas 200 Volt dan daya di atas 50 Watt (Mutua Joshua Bernard, 2014). Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan bahwa sistem ini mengendalikan motor induksi dengan tegangan *rating* 400 Volt, IGBT dipilih sebagai komponen utama pada rangkaian inverter. Diperoleh pemodelan VSI 2 level yang dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.14** Rangkaian inverter disuplai oleh tegangan DC sebesar 562,9 Volt, yang merupakan nilai puncak dari tegangan nominal motor induksi yang digunakan. Pulsa yang dihasilkan dari keluaran metode *Hysteresis Band Pulse Width*

Modulation (HBPWM) diberikan ke setiap saklar gerbang (*gate switch*) untuk mengatur proses pensaklaran pada inverter.



Gambar 3.17 Perancangan VSI 2 Level

Tegangan keluaran dari rangkaian inverter tersebut berupa tegangan tiga fasa, yang selanjutnya digunakan sebagai *input* untuk menggerakkan motor induksi.

3.12 Variabel Penelitian

Penentuan variabel penelitian dilakukan untuk menetapkan parameter yang akan dianalisis dalam mengevaluasi performa sistem pengendalian motor induksi pada setiap konfigurasi yang diuji. Variabel dari penelitian terdiri dari tiga jenis yaitu variabel bebas sebagai *input*, variabel terikat sebagai *output* dan variabel kontrol sebagai parameter yang telah ditetapkan. Adapun variabel pada penelitian sebagai berikut.

3.12.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang memberikan pengaruh terhadap variabel terikat dan tidak dipengaruhi oleh variabel lainnya. Dalam penelitian ini, variabel tersebut merupakan faktor yang secara langsung memengaruhi karakteristik keluaran sistem. Adapun variabel terikat yang diamati sebagai respons dari perubahan variabel bebas ditunjukkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Daftar Variabel Bebas

Variabel Bebas	
Variabel	Satuan
Nilai Referensi Torsi Elektromagnetik	Nm
Nilai Referensi Kecepatan Rotor	Rad/s
Nilai Referensi Fluks Stator	Wb

3.12.2 Variabel Kontrol

Variabel kontrol diperlukan sebagai parameter pasti dalam sistem kontrol yang besarnya telah ditentukan sesuai dengan kebutuhan sistem. Variabel kontrol pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Daftar Variabel Kontrol

Variabel Kontrol	
Variabel	Satuan
PI Torque Controller	-
PI Speed Controller	-
PI Flux Controller	-

3.12.3 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh perubahan pada variabel bebas. Variabel tersebut berperan sebagai keluaran atau hasil yang diperoleh dari sistem motor induksi tiga fasa sebagai objek penelitian. Adapun variabel terikat yang digunakan pada sistem yang dirancang ditunjukkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Daftar Variabel Terikat

Variabel Terikat	
Variabel	Satuan
Torsi elektromagnetik	Nm
Kecepatan Rotor	Rad/s
Arus stator	A
Tegangan Fasa Stator	V