

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Motor *Direct Current* (DC) saat ini banyak digunakan pada kendaraan listrik karena pengendalian kecepatan putar yang lebih mudah dibandingkan motor *Alternating Current* (AC) (Ma'rif & Setiawan, 2021). Motor DC pada kendaraan listrik membutuhkan torsi yang kuat dan pengendalian kecepatan yang efisien sehingga jenis motor *brushless* DC (BLDC) saat ini banyak digunakan pada kendaraan listrik. Keunggulan seperti keandalan yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih baik dibandingkan motor DC konvensional lainnya, ukuran yang lebih kecil dengan kekuatan yang sama serta pengontrolan lebih baik dikarenakan adanya sensor posisi. Pengendalian motor DC bertujuan untuk mendapatkan efisien energi dengan kecepatan yang maksimal. Sensor posisi yang ada berguna untuk mengukur lokasi rotor sehingga penyesuaian arus dapat dilakukan dengan lebih akurat (Aminah, Dalimunthe & Aulia, 2022).

Pengontrolan motor BLDC menggunakan inverter yang berfungsi sebagai komutator elektronik. Inverter jenis ini biasanya diintegrasikan dengan unit kendali elektronik, sehingga menghasilkan suatu sistem kendali kecepatan putar motor listrik atau lazim disebut sebagai sistem (*variable frequency drive*) atau *variable speed drive* (Setiawan, 2019). Pada umumnya, inverter terdiri dari beberapa bagian penting seperti modul kontrol, sirkuit daya, dan filter. Modul kontrol biasanya terdiri dari mikrokontroler atau mikroprosesor sejenis mini komputer yang mengatur operasi inverter dan menyediakan sinyal kendali untuk sirkuit daya. Sirkuit daya inverter terdiri beberapa transistor daya *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) atau *insulated gate bipolar transistor* (IGBT) yang dipasang dalam susunan *bridge*. Ketika sinyal kendali dari modul kontrol diterapkan pada transistor daya, arus listrik mengalir melalui motor BLDC dan menghasilkan gerakan motor. Kecepatan motor dapat diatur dengan mengubah frekuensi dan amplitudo sinyal kendali yang diberikan ke inverter.

Terdapat berbagai jenis inverter yang digunakan dalam pengontrolan motor seperti inverter 6 sakelar dan 4 sakelar. Kedua inverter ini memiliki cara kerja yang sama dengan pengontrolan menggunakan mikrokontroler yang mengendalikan komutasi pada mosfet pada inverter. Pada umumnya kedua inverter ini dikenal dengan *Six Switch Three Phase Inverter* (SSTPI) dan *Four Switch Three Phase Inverter* (FSTPI). Perbedaan utama dari kedua inverter hanya berada pada jumlah sakelar mosfet yang digunakan. Untuk inverter 4 sakelar hanya menggunakan 4 mosfet sedangkan 2 sakelar yang lain digantikan dengan dua buah kapasitor (Ajmal, 2019). Kelebihan dari 4 sakelar ini adalah efisiensi tinggi karna menggunakan sedikit komponen sehingga lebih kecil. Biaya yang lebih murah, kinerja lebih baik pada kecepatan rendah, dan mudah dikendalikan serta lebih mudah mengendalikan berbagai jenis motor BLDC.

Untuk menghasilkan kinerja yang baik pada kendaraan motor BLDC diperlukan suatu sistem kendali yang dapat melakukan pengontrolan kecepatan, akselerasi yang cepat (*respon time*) serta torsi yang kuat pada beban yang bervariasi. Salah satu sistem kontrol yang banyak digunakan adalah inverter 4 sakelar dengan simulasi menggunakan *software* elektronika daya. Dengan tingkat efisiensi yang lebih baik 4 sakelar menjadi pilihan desain yang direkomendasikan untuk kecepatan rendah dan membutuhkan torsi yang tinggi, selain itu pengurangan sakelar menjadikannya lebih efisien dalam pengendalian dibandingkan inverter 6 sakelar. Salah satu *software* yang banyak digunakan adalah *Power Simulation* (PSIM) yang memiliki kemampuan *respon time* yang cepat serta fitur penggunaan yang mudah. Dengan fitur aplikasi PSIM diharapkan Mampu mengurangi *overshoot* dan meredam riak torsi yang terjadi dan mencari nilai terbaik pada proses *steady state* dan *rising time* pada motor *brushless* DC (Ji Shiqi,2020).

Maka dari itu, pada perencanaan penelitian ini akan dilakukan desain sistem inverter dengan minimum *switching*. memperhatikan tingkat efisiensi serta perlindungan operasi yang lebih baik dengan desain minimal sakelar. Dengan memperhatikan nilai rugi-rugi yang diminimalkan dan kualitas riak torsi yang rendah serta desain operasi yang efisien dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan penelitian sebelumnya. Proses penelitian akan

dilakukan dengan meredam adanya *overshoot*, *steady state* dan *rising time* dengan pemilihan peendalian kecepatan yang baik. Serta menekan nilai riak torsi yang terjadi pada inverter minimum sakelar dengan memberikan perlakuan seperti pada inverter 6 sakelar yang umum digunakan. Dengan pengujian simulasi pada PSIM pada proses pengendalian motor BLDC.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka dapat dirumuskan permasalahan pada penelitian ini adalah :

- a. Bagaimana PID mampu menekan nilai *overshoot* serta mencari *nilai steady state* dan *rising time* pada inverter 4 & 6 sakelar?
- b. Bagaimana desain topologi inverter 4 sakelar yang efisien?
- c. Efisiensi daya sirkuit dalam pengendalian kecepatan pada kendaraan listrik BLDC motor dengan pengujian performa untuk menekan nilai riak torsi pada kecepatan motor?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu :

- a. Desain sistem kendali inverter 4 dan 6 sakelar dalam proses kerja motor BLDC dengan kecepatan tinggi dan kombinasi pengendali PID
- b. Performa inverter 4 sakelar mengendalikan motor BLDC yang efisien dengan pengujian kecepatan tinggi.
- c. Analisis pemberian DC link sebagai proses meredam riak torsi pada penerapan inverter 4 saklar.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan rekomendasi model driver pengendali BLDC yang lebih efisien yang akan menjaga dan mengoptimalkan perangkat-perangkat yang ada pada kendaraan listrik jenis motor. Sedangkan manfaat bagi akademisi yaitu dapat menjadi referensi untuk penelitian yang serupa atau dapat dikembangkan lagi, selain itu bermanfaat bagi

perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam perkembangan peradaban dan kesejahteraan manusia.

### **1.5 Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini, pembahasan akan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

- a. Pengujian akan dilakukan dengan level simulasi
- b. Analisis dengan Tuning (*Proportional, Integrate, Derivatif*) PID yang dilakukan dengan cara manual menggunakan Batasan iterasi dengan kondisi berbeban dan tidak berbeban.
- c. Analisis pemberian pengaruh DC link dalam proses menekan nilai riak torsi.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penulisan proposal penelitian ini adalah :

#### **BAB I Pendahuluan**

Bab ini berisikan mengenai latar belakang mengapa penelitian ini dilakukan, rumusan masalah, tujuan penulisan, Batasan masalah, dan sistematika penulisan. Latar belakang akan menjelaskan bagaimana BLDC motor menjadi salah satu motor yang digunakan pada kendaraan listrik, memberikan keterangan proses pengontrolan dengan dua inverter berbeda dan mengapa peneliti memilih FSTPI sebagai objek utama dalam penelitian ini. Rumusan masalah dan tujuan penelitian akan memberikan penjelasan mengenai focus utama yang akan dicapai pada penelitian ini serta batasan masalah menjadi bagian yang mengatasi penyimpangan agar peneliti akan tetap focus pada FSTPI dengan pengujian yang telah direncanakan yaitu PID, pengontrolan kecepatan tinggi dan peredam riak torsi

#### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini menjelaskan tentang landasan teori yang berhubungan dengan topik permasalahan yang dibahas, serta menjelaskan tentang penelitian terkait hingga kerangka pikir untuk penelitian guna memecahkan masalah yang sedang diteliti termasuk menguraikan objek penelitian. Dalam hal ini landasaan teori akan fokus

membahas bagian-bagian utama yang diteliti seperti motor BLDC yang merupakan motor yang dipilih peneliti untuk menjadi bagian dorongan ilmu pengetahuan pada pengembangan kendaraan listrik. Selanjutnya inverter pengontrol motor BLDC yaitu SSTPI dan FSTPI, peneliti akan berfokus pada FSTPI sebagai subjek utama penelitian. Selanjutnya adalah peredam riak torsi dalam hal ini adalah DC link yang akan diaplikasikan pada FSTPI yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Serta tambahan seperti penelitian yang relevan dan *state of the art* untuk menjelaskan dan memberikan proses pengembangan BLDC, inverter pengontrol motor BLDC dalam bentuk penelitian sebelumnya.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Bab ini berisi penjelasan tentang lokasi dan waktu penelitian, bagaimana metode pengerjaan tesis ini dilakukan serta langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan. Metodologi penelitian akan berfokus pada bagaimana cara meningkatkan kinerja FSTPI dalam mengontrol motor BLDC dengan beberapa metode yang akan diberikan pengujian tertentu sehingga terlihat proses peningkatan yang terjadi dan terdapat kebaruan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Sedangkan faktor pendukung yang lain seperti lokasi dan waktu adalah sasaran peneliti dalam menyelesaikan proses penelitian.

### **BAB IV Hasil Simulasi & Pembahasan**

Bab ini berisi pemaparan hasil simulasi dan desain yang telah dilakukan dengan desain baru serta pengujian yang telah dilakukan. Setelah mendapatkan desain baru akan dipaparkan data berupa tabel, grafik dan juga hasil simulasi yang telah dilakukan peneliti. Proses peningkatan kinerja pada FSTPI akan dilakukan dengan perbandingan data pada penelitian sebelumnya dan kinerja dari SSTPI.

### **BAB V Kesimpulan & Saran**

Bab ini berisi hasil yang menjawab rumusan masalah berupa desain baru, peningkatan performa dari rangkaian dan penanganan masalah yang didapatkan pada penelitian sebelumnya. Selain itu menjadi ringkasan temuan yang telah

dilakukan peneliti berupa hasil peningkatan kinerja pada FSTPI. Saran akan berisi penerapan yang telah ditemukan serta peluang perbaikan yang dapat dilakukan untuk peneliti selanjutnya atau pihak yang relevan terhadap pembahasan yang dilakukan dalam penelitian ini seperti pengembang kendaraan listrik.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Penelitian Terkait**

Sebagai dasar rujukan penelitian ini yang membahas terkait optimasi dari FSTPI dalam pengendalian motor BLDC, dibawah ini terdapat beberapa sitasi penelitian terdahulu yang relevan, informasi yang didapatkan berupa metode yang digunakan dalam menyelesaikan masalah, dan hasil yang telah dicapai pada penelitian tersebut terkait dengan FSTPI pengendali motor BLDC.

Penelitian yang dilakukan oleh Elkerdany, Safwat, Yossep dan Elkhatib pada tahun 2020, yang meneliti tentang Sistem penggerak elektrik dengan menggunakan motor BLDC saat ini banyak digunakan pada mini *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), karena menjamin efisiensi kinerja dan peningkatan ketahanan proses komutasi. Artikel ini menyajikan studi perbandingan antara sistem penggerak motor BLDC menggunakan inverter tiga fase enam sakelar non-ideal, dan inverter tiga fase empat sakelar non-ideal. Hasil penelitian menyatakan bahwa dalam kasus motor SSTPI BLDC, kecepatan rotor mengikuti kecepatan sudut referensi dalam mode aktif yang berbeda. Dalam kasus motor BLDC FSTPI, efektivitas biaya dan efisiensi yang lebih tinggi dipastikan dengan menggunakan dua kapasitor terpisah, bukan dua semikonduktor, namun dengan mengorbankan kinerja keluaran sehingga terjadi riak torsi dan terbatas dengan kecepatan yang dihasilkan.

Sejalan dengan itu penelitian yang dilakukan oleh Naseri, Farjah, Erik, Lu dan Tashakor pada tahun 2021 membahas tentang sistem penggerak BLDC berbasis Four Switch Voltage Source Inverter (FSVSI) baru diusulkan. Skema kontrol yang diadopsi terutama terdiri dari loop kontrol arus dalam berdasarkan pengontrol histeresis dan loop kontrol kecepatan luar yang direalisasikan oleh *Model Predictive Control* (MPC) dengan bantuan *PI Controller*. Bentuk gelombang arus kuasi persegi dari motor BLDC berhasil dibentuk menggunakan strategi peralihan yang efisien untuk mode operasi motor dan generator. Dibandingkan dengan pengontrol kecepatan berbasis PI, pengontrol kecepatan yang diusulkan meningkatkan kinerja dalam hal overshoot, undershoot, serta waktu pengaktifan, sehingga mengurangi tekanan pada drive motor BLDC berbasis FSVSI yang lemah.

Pengontrol MPC diwujudkan dengan menyelesaikan CF yang relevan secara offline, yang menjadikan implementasinya sesederhana pengontrol PI. Skema penggerak motor BLDC yang diusulkan akan menjadi pilihan yang sangat cocok untuk penggerak motor BLDC yang memerlukan kinerja tinggi namun biaya investasi yang sangat rendah.

Selanjutnya penelitian yang dikerjakan oleh Anagreh, Fayyad, dan Aysha yang melakukan pengembangan Penggerak motor BLDC empat sakelar berkinerja tinggi berbasis optimasi kawanan partikel. Dalam penelitian yang dikerjakan, algoritma *particle swarm optimization* (PSO) dari pengontrol PI dimanfaatkan untuk mengatur kecepatan motor DC dengan FSTPI dengan topologi yang lebih hemat dan efisien dalam respon kerja. Hasil yang dipublikasi dengan tingkat respon dinamis yang cepat dan presentase *overshoot* yang diminimalkan, serta kondisi riak sekitar 10% dalam keadaan tanpa beban selain itu, system penggerak menunjukkan fitur ketahanan ketika mengalami gangguan torsi beban eksternal.

Selain itu penelitian yang dikerjakan oleh P Mani, Kumaran, Johnson dan Kullan pada tahun 2021 yang membahas pada penelitian ini memodelkan desain yang dioptimalkan untuk SSTPI dengan basis *Single Ended Primary Inductor Converter* (SEPIC) Pemodelan desain yang dioptimalkan untuk inverter 6 saklar berbasis SEPIC terintegrasi untuk kontrol motor BLDC tanpa sensor. Dalam penelitian ini digunakan converter SEPIC yang tergabung dengan logika fuzzy dan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Dengan penggabungan tiga metode ini beberapa kelebihan dalam rangkaian elektronika dapat tercapai dan memanfaatkan inverter 4 sakelar untuk mencapai kecepatan nominal. Hasil akhir yang disimulasikan melalui Matrix Laboratory (MATLAB) mendapatkan hasil yang baik dengan data 96% efisiensi dari inverter. Pengutan tegangan 1:8 dari strategi yang diusulkan sebelumnya hanya saja pengujian dilakukan tanpa beban dan pemberian kecepatan yang masih rendah.

Terkahir yang menjadi penelitian relevan adalah penelitian yang dikerjakan oleh QS Kadhim, Abbas dan Ezzaldeen pada tahun 2021 yang membahas kontrol mode geser yang dioptimalkan pada penggerak motor BLDC inverter empat saklar menggunakan algoritma *Levy Flight Distribution* (LFD). Dalam penelitian ini

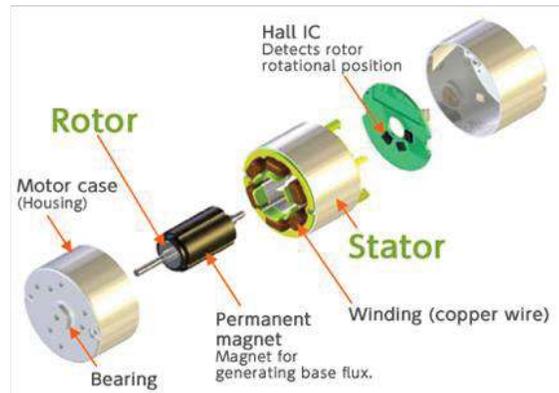
diusulkan strategi kontrol kecepatan yang akan bergantung pada dua sinyal umpan balik yaitu loop sensor kecepatan yang diatur oleh *Sliding Mode Controller* (SMC) dan loop sensor arus yang diatur oleh *proportional Integral* (PI) untuk meningkatkan kemampuan adaptasi sistem penggerak. Hasil simulasi menunjukkan SMC dengan teknik LFD memiliki keunggulan dibandingkan dengan SMC konvensional dan kontroler PI optimasi dalam hal pelacakan cepat ke nilai yang diinginkan, pengurangan kesalahan kecepatan ke nilai nol, dan overshoot yang rendah dalam kondisi perubahan secara tiba-tiba.

## 2.2 Motor BLDC

Motor BLDC adalah jenis motor listrik yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan magnet yang menggerakkan rotor. Motor ini tidak menggunakan sikat atau komutator seperti pada motor brushed. Hal inilah yang membedakan konstruksi motor BLDC dengan motor DC konvensional, sehingga keunggulan seperti rugi daya yang lebih sedikit serta perawatan lebih mudah dimiliki motor BLDC (Aryoseno & Julaiha, 2023). Keunggulan motor BLDC yang lainnya adalah umur pemakaian yang Panjang, ukuran yang kecil, kontrol yang presisi, serta torsi yang tinggi pada kecepatan yang rendah (Jati & Hapsari, 2022). Pentingnya penggunaan motor BLDC saat ini terletak pada kebutuhan akan efisiensi energi dan keandalan yang tinggi berdasarkan keunggulan yang dijelaskan sebelumnya motor BLDC menjadi pilihan utama dalam industri robotika, lingkungan dan rumah tangga.

Konstruksi utama dari motor BLDC dapat dilihat pada Gambar 1 berupa rotor, stator, sensor Hall dan komponen pendukung seperti pelindung motor. Komponen memiliki konstruksi yang berbeda seperti rotor yang terbuat dari magnet permanen, stator yang berbentuk belitan seperti konstruksi motor pada umumnya, Sensor Hall yang bertugas untuk mendeteksi posisi rotor, dan sistem kontroler umumnya adalah inverter 3 fasa. Bentuk rotor motor BLDC umumnya berbentuk persegi panjang dengan 2 buah sampai 8 buah pasang magnet permanen. Sedangkan stator motor BLDC seperti motor pada umumnya yang terdiri dari kumparan-kumparan yang terletak disekitar rotor. Konstruksi kumparan

terdiri atas kawat tembaga yang dililitkan pada inti besi yang berbentuk silinder atau toroid, dengan jumlah yang dapat bervariasi tergantung pada desain motor dan kebutuhan aplikasi.



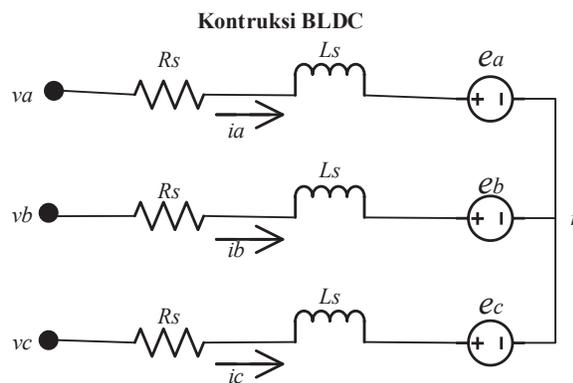
**Gambar 1** Kontruksi Komponen Utama Motor DC Brushless

Proses kerja motor DC Brushless adalah dengan prinsip sederhana adanya daya tarik rotor berupa permanen magnet dengan elektromagnet yang ditimbulkan pada rotor. Menyuplai tegangan DC dengan salah satu stator menyebabkan perubahan arah kutub yang akan menarik kutub rotor. Misalkan ketika rotor berada pada belitan A maka tegangan DC akan disuplai untuk mengubah kutub magnet pada belitan B sehingga rotor akan bergerak mengarah ke belitan B. hal ini berlangsung terus menerus menuju belitan C dan akan Kembali ke belitan A secara terus menerus dan rotor motor akan berputar.

Pengendalian motor BLDC membutuhkan beberapa hal yang harus diperhatikan seperti, nilai distorsi harmonik, inverter, motor dan Sensor Hall serta efisiensi daya yang dihasilkan. Distorsi harmonik merupakan sinyal yang terdistorsi karena arus yang dihasilkan dalam kelipatan frekuensi dari frekuensi dasar 50Hz, distorsi harmonic dihasilkan oleh beban non-linear seperti yang diketahui Motor BLDC adalah beban non-linear sehingga dapat menghasilkan harmonik distorsi (Macahig,2020). selain itu Sensor Hall menjadi penting untuk diperhatikan dalam pengendalian BLDC karena kemampuannya dalam mendeteksi kecepatan, posisi dan aplikasi penginderaan saat ini sehingga digunakan dalam BLDC untuk menentukan posisi rotor sensor ini berupa transduser yang bervariasi tegangan

output yang akan memberikan respon terhadap medan magnet (Elkerdany, Safwat, Yossef, Elkhatib, 2020).

Motor BLDC memiliki karakteristik unik dibandingkan motor DC lainnya, terutama karena jenis motor ini tidak memiliki komutator mekanis dan menggunakan pengendali elektronik untuk menggantikan siklus komutasi. Gambar 2 merupakan kontruksi pada bagian inti motor BLDC, pada gambar tersebut menjelaskan beberapa parameter seperti  $v_a$  sebagai symbol tegangan masuk,  $R_s$  sebagai resistansi pada motor,  $L_s$  merupakan nilai pengurangan induktansi sendiri pada kumparan terhadap induktansi antara kumparan. Kedua parameter ini memiliki nilai yang sama pada setiap fasa dikarenakan pengembangan lilitan pada motor BLDC memiliki jumlah lilitan dan karakteristik yang sama. Parameter  $e_a$ ,  $e_b$  dan  $e_c$  merupakan nilai gaya gerak listrik balik atau *back emf*. Berdasarkan Gambar 2 maka beberapa persamaan dapat dilihat sebagai berikut (Triwijaya, 2021)



**Gambar 2** Kontruksi Motor BLDC

Persamaan 1 merupakan hasil persamaan yang menjabarkan nilai tegangan

$$V_{dc} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_1 e_2 \quad (1)$$

EMF yang dihasilkan melintasi dua fase pembawa arus yang sebanding dengan kecepatan yang dihasilkan motor, sehingga Persamaan 2 merupakan penurunan tegangan pada motor BLDC

$$V_{dc} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \omega \quad (2)$$

Persamaan 3 merupakan penjabaran mengenai torsi elektromagnetik pada motor BLDC. Sedangkan untuk Persamaan 4 menjabarkan torsi beban dianggap bervariasi dengan kecepatan motor.

$$T_e = K_b I_a \quad (3)$$

$$T_e = K_T \omega \quad (4)$$

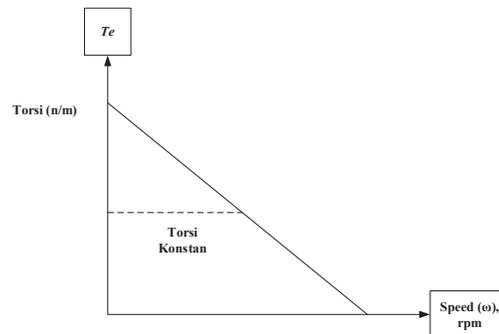
Persamaan 5 merupakan persamaan mekanik pada rotor motor, Persamaan 6 didapatkan berdasarkan substitusi sebelumnya.

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (5)$$

$$K_b I_a - K_T \omega = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (6)$$

Dimana,

- $K_b$  = EMF Konstan motor. Vs/rad (Nm/A)
- $\omega$  = Kecepatan mekanik dari rotor, rad/secon
- $T_e$  = Torsi Elektrik, Nm
- $T_l$  = Torsi beban, N.m.
- $K_T$  = Torsi Beban Konstan, N.m. s/rad
- $J$  = momen inersia, kg m<sup>2</sup>
- $B$  = Koefisien gesekan, Nm s/rad
- $R$  = Nilai resistansi pada motor ( $\Omega$ )
- $L$  = Nilai Induktansi pada motor (Henry)
- $e_1$  = GGL Induksi 1
- $e_2$  = GGL Induksi 2

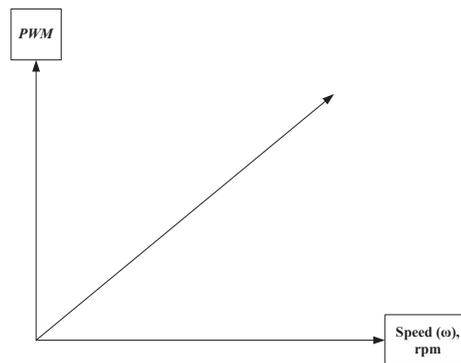


**Gambar 3** Hubungan Torsi dan Kecepatan Motor

Gambar 3 merupakan grafik hubungan kecepatan motor dan torsi (M.Abirami, 2023). Menjelaskan bahwa semakin tinggi kecepatan motor maka nilai torsi semakin rendah hal ini dapat dilihat pada Persamaan 7.

$$T_e = \frac{Pe}{\omega} = \frac{1}{\omega} \times (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) \quad (7)$$

Dimana  $P_e$  merupakan nilai daya elektromagnetik yang ada pada motor BLDC. Untuk Gambar 4 menampilkan grafik hubungan antara PWM dan kecepatan motor. Dasar hubungan PWM dan kecepatan motor BLDC pada grafik menunjukkan bahwa kecepatan motor BLDC umumnya sebanding dengan duty cycle PWM. Sinyal persegi dengan dua kondisi ON & OFF disebut PWM yang memiliki frekuensi mengendalikan tegangan rata-rata yang masuk ke motor dalam satu periode. dan duty cycle. Frekuensi akan menentukan seberapa cepat siklus pengaktifan terjadi, sedangkan duty cycle menentukan presentase waktu sinyal dalam keadaan ON. Jika duty cycle 0% maka motor tidak menerima daya sehingga kecepatan berada pada 0 rpm. Sedangkan duty cycle dengan 100% maka sepenuhnya ON motor menerima daya penuh untuk mencapai kecepatan maksimum. Hal ini sesuai dengan persamaan 8 yang menjabarkan hubungan antara keduanya (Japheth,2021)



**Gambar 4** Hubungan PWM terhadap kecepatan motor

$$\omega = \omega_{max} \times \frac{D}{100} \quad (8)$$

Dimana  $\omega_{max}$  merupakan kecepatan maksimum motor pada tegangan penuh dan D adalah duty cycle dalam bentuk persen.

### 2.2.1 Permasalahan pada pengontrolan BLDC

Pengendalian motor BLDC merupakan aspek kritis dalam berbagai aplikasi, termasuk mesin industri, kendaraan listrik, dan perangkat elektronik lainnya (Kim, 2017). Keunggulan dari motor BLDC seperti efisiensi energi, umur pemakaian

yang lama, keandalan yang tinggi ketiga aspek ini menjadi alasan utama BLDC motor banyak digunakan selain harga yang lebih murah dibandingkan dengan motor berkemampuan sama dengan motor DC lainnya (Ghifary, 2017). Proses memaksimalkan potensi motor BLDC diperlukan sistem pengendalian yang baik namun beberapa masalah terdapat pada pengendalian yang harus diatasi. Dari tantangan dalam mengelola komutasi yang tepat hingga mengoptimalkan efisiensi energi, pemahaman mendalam tentang hambatan tersebut adalah kunci merancang sistem pengendalian yang efektif dan responsif.

Pengontrolan motor BLDC melibatkan sejumlah permasalahan yang perlu diatasi untuk memastikan kinerja yang optimal. Berikut adalah beberapa permasalahan utama pada pengontrolan BLDC.

1. Sensitivitas terhadap posisi rotor, BLDC memerlukan informasi posisi rotor untuk mengatur arus dan tegangan dengan benar. Solusi dari masalah ini adalah sensor posisi rotor seperti sensor Hall dapat menimbulkan masalah jika tidak akurat atau rusak (J.S Park, 2016).
2. Komutasi yang tepat, kesalahan dalam komutasi dapat menyebabkan getaran, kehilangan daya, atau bahkan merusak motor (Zandi 2019).
3. Efisiensi energi, kontrol yang kurang efisien dapat mengakibatkan kerugian daya dan peningkatan suhu motor. Penting untuk mengoptimalkan algoritma kontrol untuk mencapai efisiensi energi yang maksimal (Li, 2016).
4. Ketidakpastian parameter, variasi parameter motor, seperti resistansi dan induktansi dapat terjadi karena perubahan suhu atau faktor lain. Sistem pengontrol harus dapat menyesuaikan diri dengan perubahan ini untuk menjaga kinerja yang stabil (Kolano, 2022).
5. Pemanasan berlebih, jika arus atau tegangan yang diberikan terlalu tinggi, atau jika beban melebihi batas yang ditentukan, motor dapat mengalami pemanasan berlebih yang dapat merusak komponen dan membatasi umur pakai motor (J.S Park, 2016).
6. Pertimbangan keterbatasan daya baterai, pada aplikasi bergerak atau baterai, penting untuk mempertimbangkan keterbatasan daya dan merancang kontrol yang efisien untuk memaksimalkan umur baterai (Sandeep, 2020).

Setiap permasalahan diatas dalam kontroler BLDC yang baik harus mampu mengatasi permasalahan dengan menggunakan algoritma kontrol yang efisien, sensor yang andal dan desain sistem yang tahan terhadap variasi dan gangguan eksternal serta pemilihan komponen tambahan yang bisa mengatasi permasalahan yang timbul dengan menambahkan desain inverter yang lain untuk mengendalikan. Pada penelitian yang relevan sebelumnya dapat disimpulkan permasalahan yang harus diatasi pada motor BLDC dengan kontroler FSTPI adalah proses pengaktifan masih mengalami *overshoot* serta nilai *steady state* dan *rising time* masih berada pada posisi yang kurang baik, kinerja pada kecepatan actual motor masih dianggap lambat dan munculnya riak torsi yang berlebih.

### 2.2.2 Sensor Posisi Motor BLDC

Dalam sistem kontrol motor BLDC, berbagai jenis sensor posisi digunakan untuk menentukan lokasi rotor, di antaranya adalah encoder, resolver, dan sensor Hall. Meskipun semua sensor ini memiliki fungsi penting, sensor Hall sering menjadi pilihan utama karena beberapa keunggulannya. Sensor Hall menawarkan ukuran yang kompak, biaya yang lebih rendah, dan kemudahan integrasi dalam desain sistem. Sensor ini dapat memberikan informasi posisi secara *real-time*, memungkinkan kontrol yang lebih responsif dan efisien dibandingkan dengan sensor lainnya, seperti encoder atau resolver, yang biasanya lebih kompleks dan mahal (K.Kolano, 2021).

Kelebihan lainnya dari sensor Hall adalah ketahanannya terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti suhu tinggi dan medan magnet yang kuat, serta kemampuannya untuk beroperasi tanpa kontak fisik, yang mengurangi risiko keausan mekanis. Meskipun encoder dapat memberikan resolusi yang lebih tinggi dan resolver memiliki keandalan dalam lingkungan yang sangat sulit, sensor Hall tetap menjadi pilihan populer untuk banyak aplikasi motor BLDC berkat kombinasi antara biaya, ukuran, dan performa yang baik (L.Wang, 2023). Seiring dengan perkembangan teknologi kontrol dan kalibrasi yang lebih canggih, penggunaan sensor Hall dalam motor BLDC terus

meningkat, menjadikannya solusi yang efisien dan efektif dalam berbagai aplikasi industri.

### 2.2.3 Jenis Pengontrolan Motor BLDC

#### a. Kontroler *Proportional Integrate Derivatif* PID

*Proportional Integrate Derivatif* (PID) merupakan system control yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi untuk menjaga parameter system pada nilai yang diinginkan (*setpoint*) (Balasaheb, 2022). PID merupakan singkatan dari tiga komponen utama yang digunakan dalam pengendalian system yang diinginkan

1. P (*Proportional*) yang bekerja berdasarkan kesalahan (*error*) antara nilai setpoint dan nilai aktual. Keluaran dari Proporsional sebanding dengan besar kesalahan tersebut maka semakin besar *error* semakin besar sinyal kontrol yang dihasilkan untuk mengurangi kesalahan yang terjadi, hal tersebut sesuai dengan Persamaan 9.

$$P(t) = K_p \times e(t) \quad (9)$$

Dimana:

$K_p$  = konstanta proporsional

$e(t)$  = error saat ini

2. I (*Integral*) memiliki fungsi untuk menghilangkan error yang terakumulasi dari waktu ke waktu. Jika hanya menggunakan komponen proporsional akan muncul error yang lebih kecil. Kelebihan parameter ini karena mampu menghitung total error seiring waktu dan memberikan kompensasi untuk memperkecil error tersebut hal ini dijelaskan pada Persamaan 10.

$$I(t) = K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

Dimana:

$K_i$  = konstanta integral

3. D (*Derivative*) komponen ini bereaksi terhadap laju perubahan error. Jika error berubah dengan cepat komponen ini memberikan aksi korektif yang cepat untuk mencegah sistem berisolasi atau menjadi tidak stabil hal ini sesuai dengan Persamaan 11.

$$D(t) = K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Dimana:

$K_d$  = Konstanta derivative

Berdasarkan penjelasan parameter sebelumnya dapat disimpulkan persamaan secara keseluruhan utamanya pada pengontrolan motor BLDC yang menjadi fokus utama pada penelitian ini dapat dianalisa pada Persamaan 12.

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

Dimana:

$u(t)$  = Output kontroler PID (Kecepatan motor BLDC)

$e(t)$  = Error perbedaan kecepatan referensi dan kecepatan actual

$K_p$  = Konstanta Proporsional

$K_i$  = Konstanta Integral

$K_d$  = Konstanta Derivatif

Perhitungan PID pada *output* berupa kecepatan motor BLDC yang perlu diperhatikan adalah nilai error. Nilai error ditemukan berdasarkan selisih kecepatan referensi dengan kecepatan actual. Setelah ditemukan maka dihitung dengan Persamaan 8 komponen PID yang telah dijelaskan sebelumnya. Penjumlahan PID akan menghasilkan sinyal control yang dikirim ke motor dalam bentuk tegangan atau PWM. PID memiliki beberapa metode untuk menentukan parameter yang dibutuhkan contohnya manual atau trial dan error, metode Ziegler-Nichols, Metode Cohen-coon, Metode otomatisasi tuning (*auto-tuning* PID), Metode Heuristic tuning, dan metode kontrol adaptif.

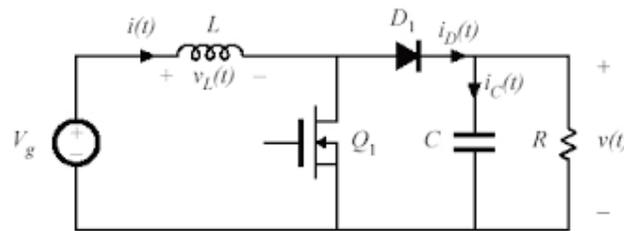
Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah *trial* dan *error* atau secara manual. Tuning kontrol PID akan dilakukan secara langsung tanpa melakukan perhitungan matematis atau algoritma tertentu. Proses tuning ini dimulai dengan mencari nilai  $K_p$  hingga mendapatkan gelombang dengan *overshoot* paling rendah dan memperhatikan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dengan nilai mendekati 1. Selama proses mencari nilai  $K_p$  dengan menaikkan secara perlahan parameter  $K_i$  dan  $K_d$  akan diberikan nilai 0. Setelah ditemukan nilai  $K_p$  dilanjutkan mencari  $K_i$  dan  $K_d$  untuk menekan nilai error *steady state* dan *rising time*. Proses ini akan diulang hingga ditemukan kestabilan sistem yang diinginkan pada masing-masing parameter penentuan jumlah iterasi didasarkan pada kemungkinan evaluasi yang lebih menyeluruh (Febriyani, 2023). Penentuan jumlah iterasi juga mencakup pengamatan yang lebih optimal terhadap respon dengan berbagai kombinasi rentang parameter dan sistem yang digunakan mendukung pengujian dengan waktu yang singkat.

#### **b. Kontroler Tegangan Secara langsung**

Pengontrolan tegangan secara langsung pada motor BLDC merupakan metode pengendalian kecepatan motor dengan mengatur besar kecilnya tegangan yang diberikan secara langsung pada lilitan stator motor (Mohanraj, 2022). Prinsip kerja sistem ini adalah semakin tinggi tegangan yang diberikan maka kecepatan motor akan semakin cepat pula. Metode pengontrolan tegangan secara langsung dilakukan dengan konverter DC-DC seperti buck konverter atau menggunakan boost konverter. Mengontrol tegangan secara langsung dapat dilakukan tanpa harus menggunakan metode yang kompleks seperti PWM.

Dalam motor BLDC pengaturan tegangan secara langsung mempengaruhi medan magnet yang dihasilkan stator, yang kemudian memnetukan gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara medan magnet

dan stator. Dengan cara ini tegangan yang lebih besar menghasilkan gaya magnet yang lebih kuat sehingga rotor akan mengalami perputaran yang lebih cepat. Meski terdapat berbagai cara kontroler langsung pada penelitian ini hanya akan berfokus pada boost konverter sebagai pengontrol tegangan secara langsung. Rangkaian boost konverter secara umum dapat dilihat pada Gambar 5. Pengaturan tegangan pada motor BLDC menggunakan boost converter adalah metode yang efektif untuk mengatur kecepatan dan torsi motor secara efisien.



**Gambar 5** Rangkaian boost konverter secara umum

Boost konverter adalah rangkaian konverter DC-DC yang berfungsi untuk menaikkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi. Dalam konteks pengendalian motor BLDC, boost konverter digunakan untuk mengatur tegangan yang diberikan ke motor. Dengan mengubah *duty cycle* pada boost konverter, tegangan output dapat dinaikkan atau diturunkan, yang pada gilirannya mengontrol kecepatan putaran motor. Tegangan yang lebih tinggi akan menghasilkan kecepatan yang lebih cepat, sedangkan tegangan yang lebih rendah akan memperlambat motor. Sistem kontrol ini biasanya melibatkan mekanisme *feedback*, seperti sensor Hall, untuk mendeteksi posisi rotor dan menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan. Metode ini memberikan efisiensi tinggi dalam penggunaan daya, karena boost konverter mampu mengatur tegangan tanpa banyak rugi daya dibandingkan dengan metode lain namun, penggunaan boost konverter menambah kompleksitas rangkaian dan berpotensi menimbulkan gangguan elektromagnetik. Meskipun demikian, pendekatan ini sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kontrol kecepatan motor yang fleksibel dan hemat energi.

## 2.3 Inverter

Inverter secara umum merupakan suatu rangkaian elektronika yang mengkonversi sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC. Sebuah inverter disuplai dari sebuah sumber DC dimana output tegangan dan arus AC-nya mempunyai komponen fundamental dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat divariasikan (Hasan dkk, 2020). Komponen utama dari rangkaian inverter, umumnya memerlukan komponen semikonduktor pensaklaran berupa MOSFET atau IGBT. Untuk rangkaian inverter 3 fasa, memerlukan 6 komponen semi konduktor untuk membuat *bridge* inverter 3 fasa (Nayar, 2019). Dalam pengendalian motor BLDC terdapat inverter jenis berbeda dalam mengendalikan proses komutasi pada motor BLDC.

Inverter 3 fasa secara umum dan inverter 3 fasa yang digunakan untuk mengontrol motor BLDC memiliki perbedaan signifikan dalam prinsip operasi, control dan aplikasi. Inverter 3 fasa umum berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa sinusoidal atau mendekati sinusoidal stabil. Penerapan inverter 3 fasa umum digunakan untuk menggerakkan motor AC induksi atau perangkat yang membutuhkan daya AC. Inverter yang digunakan untuk motor BLDC bekerja dengan prinsip komutasi elektronik yang berarti outputnya tidak berbentuk sinusoidal melainkan trapezoidal atau berbasis PWM. Inverter jenis ini secara aktif akan mengendalikan urutan pensaklaran tegangan berdasarkan posisi rotor motor yang mendapatkan perintah berdasarkan deteksi sensor Hall.

Aplikasi inverter motor BLDC banyak ditemukan dalam perangkat yang membutuhkan respon dinamis dan efisien tinggi, seperti kendaraan listrik, drone, dan perangkat rumah tangga. Dapat disimpulkan bahwa inverter motor BLDC dirancang untuk kontrol posisi rotor yang presisi dan torsi yang optimal dalam berbagai kondisi operasional. Terdapat dua model umum yang digunakan untuk desain inverter motor BLDC yaitu dengan 6 sakelar atau SSTPI dan 4 sakelar atau FSTPI

### 2.3.1 Inverter dengan 6 sakelar

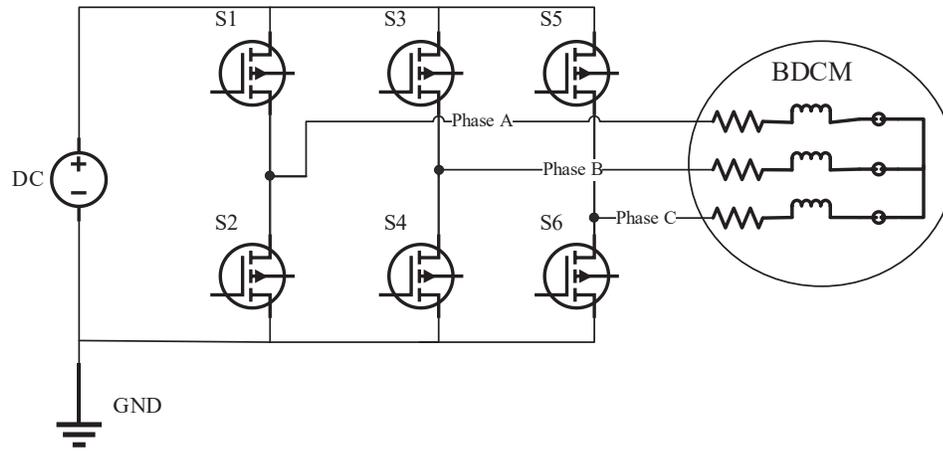
Dalam pengendalian motor BLDC penggunaan inverter dengan 6 sakelar adalah salah satu metode yang banyak digunakan saat ini dengan tujuan pengendalian kecepatan serta arah putaran rotor pada motor BLDC. Inverter dengan 6 sakelar juga dikenal dengan inverter V/F (Volt per Hertz), merupakan sebuah sistem pengendalian yang mengatur kecepatan motor BLDC dengan mengubah tegangan (V) yang diberikan ke motor berdasarkan frekuensi (f) tegangan tersebut (Paays & Dewantara). Pada umumnya inverter ini menggunakan algoritma kontrol *open-loop*, yang berarti sistem tidak memerlukan umpan balik informasi posisi atau kecepatan motor.

Inverter 6 sakelar merujuk pada pola 6 langkah atau 6-level yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor. Setiap langkah mengacu pada nilai tegangan dan frekuensi yang berbeda untuk menggerakkan motor ke kecepatan tertentu, untuk gambaran inverter dengan 6 sakelar dapat dilihat pada Gambar 6 terdapat beberapa komponen utama seperti *Volt Direct Current* (VDC), MOSFET, grounding dan Motor BLDC. Untuk persamaan non ideal yang digunakan pada SSTPI dapat dilihat pada Persamaan 13 (Elkerdany, 2020)

$$u_A = (R_a + R_{DS(on)})i_a + \frac{d}{dt}(L_a i_a + M_{ab}i_b + M_{ac}i_c) + e_a \quad (13)$$

Dimana :

$u_A$	= Terminal Voltage Fasa
$R_a$	= Resistansi Fasa
$R_{DS(on)}$	= Resistansi Menyala ke sumber
$L_a$	= Induktansi Fasa a
$M_{ab}$	= Induktansi Fasa b
$M_{ac}$	= Induktansi fasa c
$e_a$	= Fasa GGL



**Gambar 6** Topologi Rangkaian Inverter SSTPI

Prinsip kerja inverter ini dengan mengatur tegangan bolak balik menuju motor BLDC. Pengaturan kecepatan pada motor BLDC maka inverter akan mengubah frekuensi tegangan AC yang diberikan ke motor sebanding dengan kecepatan yang diinginkan. Untuk PWM pada inverter 6 sakelar, PWM bekerja dengan mengubah durasi pulsa tegangan dalam satu siklus waktu. Semakin lama durasi pulsa maka semakin tinggi pula tegangan efektif yang diberikan.

Keuntungan dari penggunaan inverter 6 sakelar termasuk biaya yang lebih rendah, instalasi yang mudah, dan kinerja yang cukup untuk aplikasi yang tidak memerlukan tingkat kepresisian yang tinggi (Sartika, Muliady & Alfian, 2019). Namun, kekurangannya adalah kurang efisiennya sistem kontrol ini dan kurangnya kemampuan untuk mengatasi beban yang berubah-ubah dengan cepat. Secara keseluruhan, inverter 6 sakelar adalah metode sederhana yang banyak digunakan dalam aplikasi yang tidak memerlukan tingkat kepresisian dan kontrol yang sangat tinggi pada motor BLDC. Untuk aplikasi yang lebih canggih dan memerlukan kinerja yang lebih baik, teknik pengendalian berbasis sensor atau metode inverter vektor mungkin lebih sesuai.

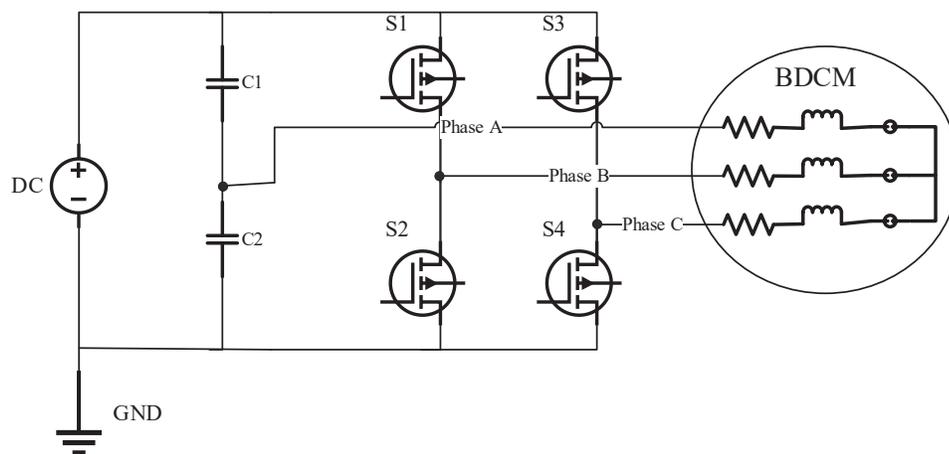
### 2.3.2 Inverter dengan 4 sakelar

Pengendalian motor BLDC menggunakan 4 sakelar adalah salah satu metode yang bekerja dengan cara menguba amplitudo dan frekuensi tegangan yang diberikan ke motor sesuai dengan kebutuhan. Inverter 4 sakelar bekerja pada pola 4 langkah atau 4 level yang digunakan dalam proses pengendalian kecepatan motor. Pola ini lebih sederhana dibandingkan dengan sakelar 6 dan memerlukan dua level tegangan untuk menggerakkan motor dengan kecepatan yang rendah atau tinggi. Topologi inverter ini dapat dilihat pada Gambar 7 perbedaan komponen pada inverter jenis ini adalah dengan tambahan kapasitor, Dibandingkan dengan SSTPI, tegangan yang dihasilkan dari titik sumber ke motor menggunakan FSTPI dapat dilihat pada Persamaan 14.

$$u_c = Ri_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c + V_{C1} \quad (14)$$

Dimana:

- $u_c$  = Terminal Voltage Fasa
- $Ri_c$  = Resistansi Arus Kapasitor
- $L$  = induktansi fasa b
- $M$  = Induktansi Fasa c
- $e_c$  = fasa GGL
- $V_{C1}$  = Tegangan fasa a



**Gambar 7** Topologi Rangkaian Inverter FSTPI

Keuntungan dari penggunaan inverter 4 sakelar termasuk biaya yang lebih rendah, instalasi yang mudah, dan dapat memberikan kontrol yang

memadai untuk sebagian besar aplikasi motor BLDC. Namun, seperti inverter 6 sakelar, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan. Kekurangannya termasuk respon yang kurang baik terhadap perubahan beban dan tidak seakurat atau sepresisi inverter berbasis sensor atau teknik kontrol yang lebih canggih. inverter 4 sakelar umumnya digunakan dalam aplikasi motor BLDC yang tidak memerlukan tingkat kontrol kecepatan yang sangat tinggi atau ketepatan posisi yang presisi. Untuk aplikasi yang lebih canggih dan kritis, teknik pengendalian yang lebih canggih seperti inverter vektor atau pengendalian sensor akan lebih sesuai.

### 2.3.3 Perbandingan Inverter 6 & 4 Sakelar pengendali Motor BLDC

Pentingnya pengendalian yang presisi dalam operasi motor BLDC mendorong inovasi terus-menerus dalam desain dan teknologi inverter. Inverter adalah kunci komponen dalam mengatur daya dan putaran motor BLDC, dan penggunaan inverter dengan jumlah sakelar yang tepat dapat memainkan peran vital dalam mencapai performa yang optimal (Hanan dkk, 2018). Perbandingan antara inverter SSTPI dan FSTPI berdasarkan kapabilitas masing masing dapat dilihat pada Tabel 1 dengan penjelasan inverter yang memiliki keunggulan masing-masing.

**Tabel 1** Perbandingan Kapabilitas SSTPI & FSTPI

No	Kapabilitas	FSTPI	SSTPI
1	Efisiensi penggunaan Daya	Lebih Baik	Baik
2	Efisiensi Perangkat	Lebih Baik	Baik
3	kemudahan Pengontrolan	Lebih Baik	Baik
4	Penggunaan pada aplikasi berat	Baik	Lebih Baik
5	Pemeliharaan komponen	Lebih Baik	Baik
6	Kontrol lebih presisi terhadap rotor	Baik	Lebih Baik
7	Reduksi Getaran	Baik	Lebih Baik
8	Keseimbangan Arus	Baik	Lebih Baik

## 2.4 Sistematika kerja Inverter 4 Sakelar

Cara kerja inverter 4 sakelar secara umum sama dengan inverter 6 sakelar hanya saja proses pengendalian inverter 4 sakelar lebih mudah dan lebih efisien. Pada pengendalian ini terdapat kemungkinan hanya menggunakan 1 sakelar MOSFET yang aktif dikarenakan satu fasa akan terhubung dengan titik tengah DC-link kapasitor yang akan mengisi dimode tertentu dengan syarat adanya beda tegangan. Untuk mode pembangkitan komutasi pada inverter 4 sakelar sesuai dengan penelitian yang dilakukan Shaju & Jhon dapat dilihat pada Tabel 2 yang menjelaskan fasa aktif dan tidak aktif serta proses pensakelaran pada FSTPI.

**Tabel 2** Mode Komutasi FSTPI

Mode	Fasa aktif	Fasa tidak aktif	Komutasi Sakelar
I	C & B	A	S4
II	A & B	C	S1 & S4
III	A & C	B	S1
IV	B & C	A	S3
V	A & B	C	S2 & S3
VI	A & C	B	S2

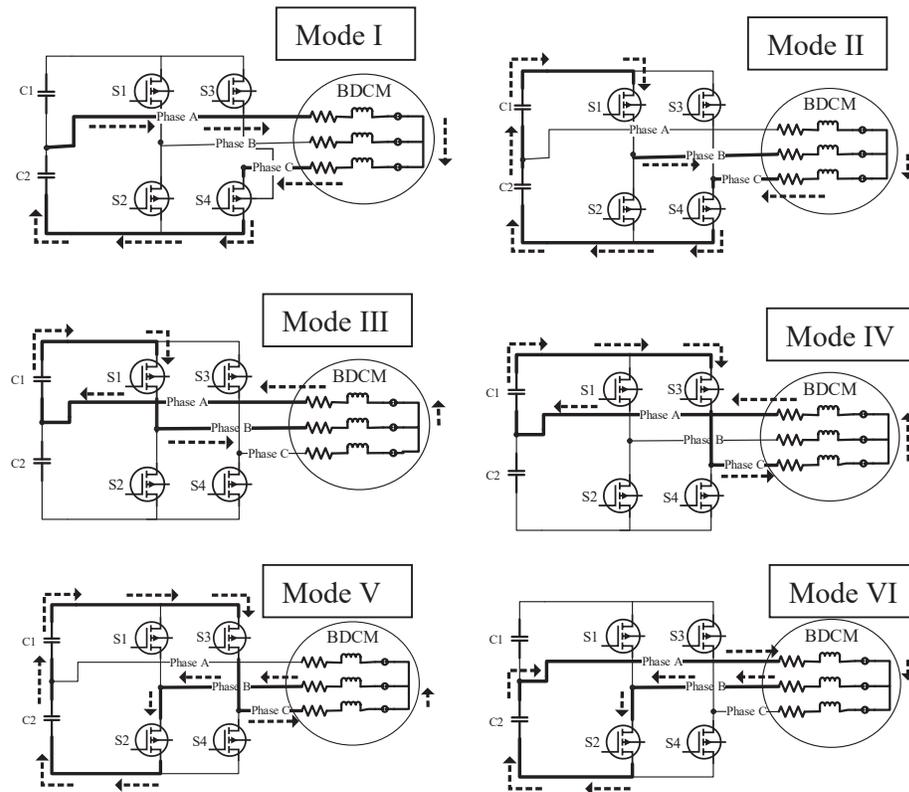
- a) Mode I penyalan daya pada sumber VDC akan mengalirkan tegangan menuju kapasitor yang dipasang secara parallel terhadap sumber VDC. Pada proses ini pengisian kapasitor terjadi secara terus menerus dengan memperhatikan keadann bahwa kapasitor yang dipasang secara seri akan melakukan pembagian tegangan sehingga tegangan pada masing-masing kapasitor adalah  $VDC/2$ . Sesaat setelah itu S4 akan memulai komutasi pertama dengan sumber dari kapasitor 2 arah arus dari fasa C – B dengan arah putaran dari  $0^\circ - 30^\circ$ .
- b) Mode II dilanjutkan dengan kondisi komutasi aktif adalah sakelar S1 & S4 dengan aktifnya sakelar atas & bawah sehingga sumber yang akan digunakan adalah VDC sepenuhnya, sedangkan kapasitor 1 & 2 akan melakukan pengisian dari kekurangan arus yang telah digunakan sebelumnya. Arus akan mengalir dari fasa A – B dengan putaran motor dari  $30^\circ - 90^\circ$ .
- c) Mode III dengan kondisi komutasi hanya sakelar S1 yang aktif maka sumber utama berasal dari pelepasan kapasitor 1. Sehingga arah arus akan mengalir dari fasa A-C. meski tidak terhubung dengan titik negative sumber VDC arus

akan tetap mengalir dengan ketentuan kapasitor yang dipasang secara seri akan menghasilkan titik netral diantara keduanya. Sedangkan arah putaran motor dari  $90^{\circ}$ - $150^{\circ}$

- d) Mode IV dengan kondisi komutasi berada pada sakelar S3 yang aktif dengan sumber tegangan dari kapasitor 1. Proses pelepasan dapat terjadi 2 kali dikarenakan kapasitor 1 tetap mendapatkan suplai tegangan dari sumber VDC dan pembagian dari kapasitor 2 hal ini membutuhkan pemahaman terkait tegangan minimum dan maksimum dari setiap komponen inverter dan motor. Pada mode ini arus akan bergerak dari fasa B – C dengan arah putaran dari  $150^{\circ}$  -  $210^{\circ}$ .
- e) Mode V dengan kondisi komutasi sakelar yang aktif adalah S2 & S3 dengan mengaktifkan sakelar bagian atas dan bawah sehingga sumber tegangan sepenuhnya adalah VDC. Maka kedua kapasitor akan kembali melakukan pengisian kembali pada mode ini arus akan mengalir dari A-B dengan arah putaran  $210^{\circ}$  -  $270^{\circ}$ .
- f) Mode VI dengan kondisi sakelar yang aktif adalah S3 dengan sumber tegangan hanya akan diambil dari kapasitor 2 dengan arah arus dari fasa A-C serta arah putaran  $270^{\circ}$  -  $330^{\circ}$

Dalam semua mode komutasi tersebut, aliran arus dimulai dari sumber tegangan melalui yang diaktifkan. Arus listrik mengalir melalui kapasitor 1 dan 2 untuk mengisi kapasitor dengan tegangan. Kapasitor berfungsi sebagai penyimpan energi listrik dan mampu menampung tegangan saat diisi oleh arus listrik. Setelah kapasitor terisi penuh, kapasitor akan melepaskan tegangan melalui motor BLDC untuk menggerakkan motor.

Proses ini berulang dalam setiap mode komutasi untuk menjaga aliran listrik yang stabil dan memastikan motor BLDC beroperasi dengan baik proses ini dapat dilihat pada Gambar 8. seperti yang diketahui dalam proses komutasi pada motor BLDC belitan stator harus diberi energi secara berurutan untuk memutar rotor.



**Gambar 8** Konfigurasi Mode Komutasi FSTPI

Motor BLDC akan dibantu dengan adanya sensor Hall yang tertanam di stator pada ujung motor yang bergerak. Adanya sensor Hall akan mendeteksi posisi rotor dengan memberikan sinyal tinggi/rendah ketika rotor lewat dan menunjukkan Kutub Utara dan Selatan yang melewati sensor Hall dengan adanya sinyal tersebut urutan pergantian yang tepat akan ditentukan. Untuk menentukan posisi signal rotor dapat diperhatikan pada Tabel 3.

**Tabel 3** Signal Posisi Rotor (Hajiaghasi, 2019)

Mode	Signal Posisi Rotor	Referensi Arus		
		$I_a$	$I_b$	$I_c$
Mode I	$(0^\circ < \theta < 30^\circ)$	0	-I	I+
Mode II	$(30^\circ < \theta < 90^\circ)$	I+	-I	0
Mode III	$(90^\circ < \theta < 150^\circ)$	I+	0	-I
Mode IV	$(150^\circ < \theta < 210^\circ)$	0	I+	-I
Mode V	$(210^\circ < \theta < 270^\circ)$	-I	I+	0
Mode VI	$(270^\circ < \theta < 330^\circ)$	-I	0	I+

## 2.5 State of Art Penelitian

**Tabel 4** *State of the Art*

No	Penulis/ Tahun	Masalah yang dibahas	Metode yang digunakan	Hasil yang dicapai
1	Anagreh (2022)	Penerapan kontroler motor BLDC 4 saklar dengan pengontrol PI	Pengontrol PI dirancang untuk mengontrol kecepatan dan evaluasi dengan simulasi	Kesalahan kondisi tunak sistem dibatasi dalam 1% sambal meningkatkan kinerja transien.
2	Yunrui Lan / 2020	Penyajian topologi baru FSTPI yang menggabungkan sumber Z kuasi	Metode Kontrol <i>Quasi Z-source Four Switch Three-Pahse</i> (QZFSTP) disimulasikan dalam Matlab/Simulink	Tegangan DC-link inverter dapat mencapai nilai rating dengan cepat.
3	Paldin. / 2023	Analisis pergantian baru untuk BLDC dengan dasar teori transformasi koordinat.	Penggunaan metode transformasi kordinat, yang umumnya digunakan pada motor ac 3 fase	Control komutasi yang bisa menekan riak torsi dan memperpendek waktu komutasi
4	C. Xia / 2016	Skema control arus pengurangan riak daerahkonduksi normal dan daerah pegantian	Penambahan dua vektor pengatur kedalam setiap siklus control berdasarkan skema PWM tradisional	Didapatkan hasil ketepatan dan keefektifan dalam eksperimen kecepatan yang diusulkan.
5	Tyas / 2019	Membahas metode pengaturan kecepatan yaitu metode scalar.	Control kecepatan skalar untuk motor BLDC dengan FSTPI	Kecepatan motor BLDC menggunakan FSTPI membutuhkan daya yang lebih tinggi untuk kecepatan yang sama dengan FSTPI
6	Ezzaldean / 2019	Desain pengontrol dua loop lengkap untuk motor BLDC FSTPI	Kontroler yang diusulkan terdiri dari control kecepatan mode geser dan control hiserisis arus searah	Penerapan pengontrol yang diusulkan dalam sistem penggerak motor BLDC 4 sakelar biaya rendah.
7	Duy. P.C /2022	Konsep dan prinsip dasar inverter sumber tegangan tiga fase FSTPI	Metode pengujian terhadap tegangan dengan vector pada matlab/simulink	Menghasilkan sistem yang lebih efisien serta pemahaman terhadap perencanaan model selanjutnya.
8	Yao /2023	Modulated Model Predictive Current Control of Four Switch Voltage Source Inverter-fed Brushless DC Motor	Metode Kontrol Arus Prediktif termodulasi (MPCC)	Metode yang diusulkan menghasilkan keefektifan sesuai yang direncanakan

Penelitian ini bertujuan utama untuk mendapatkan sebuah sistem kendali motor BLDC menggunakan FSTPI yang bekerja dengan baik dengan memperhatikan kontroler yang dipilih dalam menekan nilai *overshoot* dan menemukan nilai terbaik pada *steady state* dan *rising time*. Pengendalian kecepatan yang lebih tinggi dan menekan nilai riak torsi yang muncul pada output kecepatan motor BLDC. Maka dijabarkanlah beberapa penelitian terkait sebagai dasar perbandingan kebaruan yang akan dilakukan pada penelitian ini.

Berdasarkan beberapa penelitian yang dibahas pada Tabel 4 maka akan dijabarkan pengembangan FSTPI sehingga muncul ide penelitian yang harus dikerjakan dan mengatasi kesamaan hasil dalam pengembangannya. Masalah utama yang ditemukan dalam pengembangan motor BLDC dengan FSTPI adalah *overshoot*, *steady state*, *rising time*, dan kecepatan yang rendah serta riak torsi yang berlebih. Permasalahan ini memiliki beberapa proses dalam mengatasinya seperti pada penelitian yang dilakukan (Kumar, 2014), (Xia, 2015), (Jiang, 2016) dan (C. Xia, 2016) menggunakan kontroler PI yang memiliki kekurangan dalam analisis lebih rinci sehingga dapat diatasi dengan mencoba pengontrolan yang lebih lengkap yaitu PID. Dengan pengembangan kontroler PID diharapkan permasalahan *overshoot*, *steady state* dan *rising time* dapat diatasi.

Permasalahan selanjutnya adalah adanya minimum kecepatan yang dikembangkan dari ke semua penelitian yang ada pada Tabel 4 terlihat rata-rata kecepatan motor BLDC masih berada pada kecepatan lambat yaitu 1000-2500 RPM. Permasalahan ini dapat diatasi dengan melakukan pengembangan proses komutasi dengan melakukan tahapan 6 komutasi secara langsung sehingga motor BLDC dapat mencapai kecepatan hingga 6000 RPM atau tergolong kecepatan tinggi. Riak torsi adalah permasalahan terakhir dari beberapa penelitian sebelumnya seperti penelitian (Ezzaldeen, 2019) (Duy, 2022) dan (Yao, 2023) dengan melakukan beberapa pegontrolan dan mengatur kecepatan menjadi rendah serta meningkatkan tegangan. cara yang bisa dikembangkan pada penelitian selanjutnya adalah penerapan DC link yang sering digunakan pada kontroler motor BLDC dengan SSTPI.

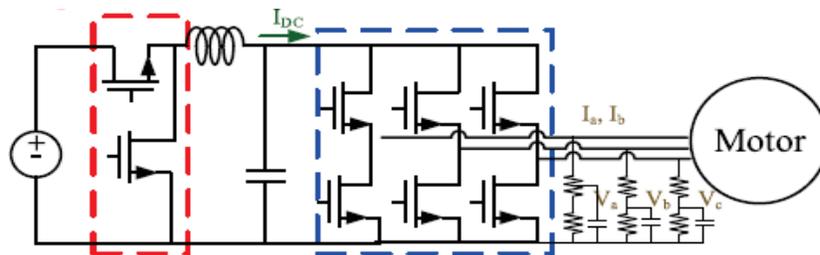
## 2.6 Riak Torsi

Riak torsi adalah variasi atau fluktuasi pada nilai torsi yang dihasilkan oleh motor listrik selama beroperasi. Riak torsi menyebabkan torsi yang dihasilkan oleh motor tidak konstan, tetapi berfluktuasi seiring waktu atau sudut putaran rotor (D. Mohanraj, 2022). Kondisi ini bisa mengurangi efisiensi motor, menimbulkan getaran mekanis, dan menyebabkan suara berisik, terutama pada motor yang memerlukan torsi halus dan presisi seperti motor BLDC dan motor PMSM. Pada penelitian ini akan berfokus pada motor BLDC yang memiliki standar riak torsi pada angka 10-15% menurut penelitian Tae Yong Lee pada tahun 2017.

Riak Torsi dalam motor BLDC adalah variasi atau fluktuasi dalam torsi yang dihasilkan, seringkali disebabkan oleh ketidaksempurnaan dalam desain atau komutasi motor. Variasi ini dapat mengakibatkan kinerja motor yang kurang halus, getaran, atau kebisingan yang tidak diinginkan. Untuk mengurangi riak torsi, beberapa pendekatan dapat diterapkan. Pertama, penggunaan sensor posisi rotor yang akurat, seperti encoder, dan penerapan algoritma komutasi canggih dapat meningkatkan akurasi komutasi motor. Kedua, pengendalian arus yang lebih baik melalui teknik PWM dan kontrol arus yang presisi, seperti kontrol PID, membantu menjaga kestabilan arus dan mengurangi fluktuasi torsi. Ketiga, penggunaan filter untuk menyaring sinyal arus dan tegangan serta memastikan stabilitas catu daya dapat mengurangi harmonik yang menyebabkan riak.

Proses penanganan riak torsi pada motor utamanya motor BLDC dapat dilakukan dengan pendekatan perangkat lunak atau *software* maupun perangkat keras atau *hardware*. Pendekatan perangkat lunak berfokus pada algoritma kontrol yang digunakan untuk mengelola operasi motor. Metode ini dapat melibatkan pemrograman algoritma kontrol yang lebih canggih salah satunya dengan PID. Pendekatan perangkat keras melibatkan modifikasi fisik atau penggunaan komponen tambahan untuk mengurangi riak torsi. Contohnya adalah penggunaan filter ataupun pengontrol arus dan tegangan. Pada penelitian ini berfokus pada

simulasi perancangan DC link yang merupakan perangkat keras yang mencegah arus berlebih masuk ke motor BLDC.



**Gambar 9** Topologi DC link

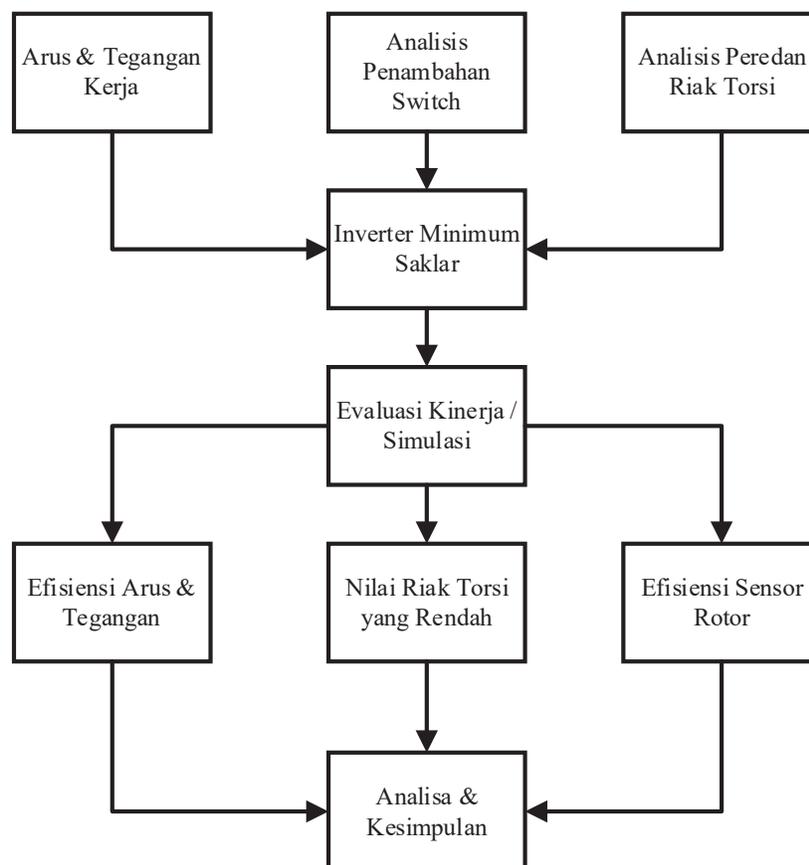
Modulasi tegangan DC-link juga menjadi salah satu cara mengatasi adanya riak torsi pada motor BLDC. dalam percobaannya topologi ini berhasil menurunkan riak torsi pada inverter 6 sakelar. DC link akan bekerja dengan menjaga arus motor tetap konstan selama terjadi proses komutasi BLDC secara normal. Dalam pengembangannya rangkaian DC-link dapat dilihat pada Gambar 9 (Huang, 2022). Pada rangkaian tersebut dapat dilihat dua mosfet yang akan bekerja untuk menjaga kualitas arus yang mengalir sehingga pada proses pemindahan komutasi arus tetap akan bekerja tanpa adanya proses fluktuasi yang terjadi. Rangkaian DC link akan diujikan pada rangkaian FSTPI untuk menjadi proses yang dilakukan untuk meredam riak torsi yang terjadi.

## 2.7 Kerangka Pikir

Kerangka pikir yang ditampilkan dalam penelitian ini menggambarkan alur logis yang berfokus pada peningkatan kinerja motor BLDC dengan mengurangi riak torsi dan meningkatkan efisiensi arus serta tegangan dapat dilihat pada Gambar 10. Penelitian dimulai dengan menganalisis arus dan tegangan kerja motor, yang kemudian dilanjutkan dengan dua pendekatan utama: penambahan switch dan analisis peredam riak torsi. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan gangguan pada performa motor dan memastikan arus serta tegangan berjalan dengan lebih stabil.

Setelah itu, solusi yang diusulkan adalah penggunaan inverter dengan jumlah saklar minimum. Inverter ini dipilih karena dianggap mampu

mengoptimalkan kinerja motor BLDC secara efisien, dengan kompleksitas yang lebih rendah. Desain ini kemudian dievaluasi melalui simulasi untuk memastikan bahwa sistem yang dihasilkan memberikan hasil yang optimal dalam hal efisiensi arus dan tegangan, pengurangan riak torsi, serta efisiensi dari sensor rotor. Hasil akhir dari penelitian ini akan berfokus pada evaluasi dan analisis data dari simulasi yang dilakukan. Simulasi akan menunjukkan seberapa efektif metode yang digunakan dalam meningkatkan efisiensi energi motor BLDC, menurunkan riak torsi, serta mempertahankan kinerja motor yang stabil. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan ini dapat memberikan solusi yang lebih efisien dalam pengoperasian motor BLDC.



**Gambar 10** Kerangka Pikir Penelitian