Konverter Statis untuk Penggerak Motor Switched Reluctance

Slamet Riyadi

Universitas Katolik Soegijapranata Semarang

> BUKU AJAR 2019



ISBN: 978-623-7635-11-6

Konverter Statis untuk Penggerak Motor Switched Reluctance

ISBN: 978-623-7635-11-6

Slamet Riyadi Program Studi Teknik Elektro Universitas Katolik Soegijapranata Semarang

UNIVERSITAS KATOLIK SOEGIJAPRANATA SEMARANG

© Universitas Katolik Soegijapranata 2019 Penerbit : Universitas Katolik Soegijapranata JI. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur, Semarang 50234 Telp. (024)8316142, 8441555 Fax. (024)8415429, 8442265 e-mail : penerbitan@unika.ac.id



Didedikasikan kepada mereka yang sangat berperan dan berarti dalam hidupku

PRAKATA

Puji syukur kami ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena Buku Ajar dengan judul **Konverter Statis untuk Penggerak Motor Switched Reluctance** telah dapat diselesaikan. Buku ini disusun berdasarkan pemikiran Penulis yang telah lama dikaji dan diteliti. Tujuan dipublikasikan buku ini agar masyarakat khususnya para mahasiswa dan peneliti lokal dapat mengenal teknologi ini.

Kegiatan belajar mengajar di bidang Teknik Elektro menuntut peran aktif para dosen dalam mengembangkan wawasan keilmuannya mengingat perkembangan disiplin teknik elektro yang begitu pesat. Pada rumpun Aplikasi Industri, keterkaitan ilmu yang dipelajari dengan implementasi di lapangan sangat erat sekali. Dengan dilandasi oleh hasil kajian literatur dan hasil penelitian maka diharapkan para dosen mampu menuangkan hasil karyanya menjadi buku atau diktat yang dapat dipergunakan untuk meningkatkan kualitas materi pengajarannya.

Kami sadar bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kami menantikan sumbangan para pembaca dalam bentuk kritik dan saran.

Hormat kami,

Penulis

PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU

Buku ini dapat digunakan oleh mahasiswa yang ingin mendalami tentang penggunaan motor listrik pada electric vehicle khususnya motor switched reluctance, selain itu juga dapat digunakan sebagai pendukung penelitian bagi para peneliti dengan topik terkait. Pustaka yang dirujuk dalam penyusunan buku ini didominasi oleh jurnal-jurnal ilmiah dikarenakan penelitian penelitian yang telah dilakukan Penulis merupakan topik yang sedang dibutuhkan dan banyak dikembangkan Peneliti luar.

Dalam menggunakan buku ini maka disarankan untuk memahami dasar-dasar teori terlebih dahulu baik dari buku referensi maupun jurnal ilmiah. Untuk memudahkan pemahaman maka isi pada buku ini disusun secara sistematis. Untuk pemahaman lebih lanjut maka Pembaca dapat menggunakan perangkat lunak sebagai dasar simulasi (disarankan PSIM). Simulasi dapat dilakukan untuk melakukan verifikasi dan melakukan perancangan sederhana.

DAFTAR ISI

| PRAKAT | Α | V |
|------------|---|-----|
| PETUNJU | JK PENGGUNAAN BUKU | vi |
| DAFTAR | ISI | vii |
| DAFTAR | GAMBAR | ix |
| | | |
| BABI | Motor Switched Reluctance | 1 |
| 1.1 | Dasar Motor Switched Reluctance | 1 |
| 1.2 | Persamaan Torka Motor Switched Reluctance | 7 |
| BAB 2 | SRM Drive dengan Konverter Jenis Miller | 11 |
| 2.1 | Topologi Konverter Jenis Miller | 11 |
| 2.2 | Implementasi Konverter Jenis Miller untuk SRM 6/4 | 13 |
| 2.3 | Hasil Simulasi | 15 |
| 2.4 | Hasil Pengujian Laboratorium | 20 |
| BAB 3 | SRM Drive dengan Konverter Jenis C-Dump | 27 |
| 3.1 | Konverter Jenis R-Dump (R-Dump Converter) | 27 |
| 3.2 3.3 | Konverter Jenis C-Dump (C-Dump Converter) Konverter Jenis C-Dump dengan Transistor | 28 |
| | Freewheeling | 31 |
| 3.4 | Konverter Jenis C-Dump dengan Resonant Energy | 33 |
| 3.5 | Konverter Jenis C-Dump dengan Dumped Energy | 55 |
| | Recovery | 36 |
| 3.6 | Konverter C-Dump Jenis Energy Efficient #1 | 37 |
| 3.7 | Konverter C-Dump Jenis Energy Efficient #2 | 40 |
| 3.8 | Hasil Simulasi | 42 |
| 3.9 | Hasil Pengujian Laboratorium | 46 |
| BAB 4 | SRM Drive dengan Konverter Asymmetric | 55 |
| 4.1 | Topologi | 55 |
| 4.2 | Kendali Berbasis Arus dan Tegangan | 60 |
| 4.3 | Peningkatan Unjuk Kerja | 65 |
| | Daftar Pustaka | 81 |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar-1.1 | Berbagai varian SRM dengan jumlah stator dan rotor berbeda | | | | | |
|----------------------------|--|----------|--|--|--|--|
| Gambar-1.2 | Besar stroke pada switched reluctance motor 6/4 Posisi aligned dan unaligned antara rotor-stator pada | | | | | |
| Gambar-1.3 | switched reluctance motor | | | | | |
| Gambar-1.4 | Pergerakan rotor dari θ_0 ke θ_1 pada switched reluctance motor | 5 | | | | |
| Gambar-1.5 | Pergerakan rotor dari θ_1 ke θ_2 pada switched reluctance motor | 5 | | | | |
| Gambar-1.6 | Pergerakan rotor dari θ_2 ke θ_3 pada switched reluctance motor | 6 | | | | |
| Gambar-1.7 | Pergerakan rotor dari θ_3 ke θ_4 pada switched reluctance motor | 6 | | | | |
| Gambar-1.8 | Pergerakan rotor dari $	heta_4$ ke $	heta_5$ pada switched | <u> </u> | | | | |
| Gambar-1.9 | Pengaruh posisi rotor terhadap nilai induktansi pada switched reluctance motor | ю 7 | | | | |
| Gambar-1.10 Gambar-1.11 | Rangkaian ekuivalen switched reluctance motor Kurva energy-coenergy pada switched reluctance | | | | | |
| Gambar-1.12 | motor Pengaruh kemiringan induktansi fasa terhadap pembangkitan torka pada switched reluctance motor | | | | | |
| Gambar-1.13 | Karakteristik torka-kecepatan dari motor jenis SRM | 10 | | | | |
| Gambar-2.1 | Rangkaian ekuivalen dengan kendali sudut pensaklaran pada switched reluctance motor (a) build- up mode (b) excitation mode (c) demagnetizing mode (d) freewheeling mode | 11 | | | | |
| Gambar-2.2 | Berbagai macam topologi konverter | | | | | |
| Gambar-2.3 Gambar-2.4 | Topologi konverter (n+1) untuk SRM1Excitation mode pada topologi konverter (n+1) untukSRM | | | | | |
| Gambar-2.5 | Freewheeling mode pada topologi konverter (n+1) | 14 | | | | |
| Gambar-2.6 | Demagnetizing mode pada topologi konverter (n+1) | 14 | | | | |
| Gambar-2.7 | Rangkaian untuk simulasi yang terdiri dari (n+1) konverter, SRM, Rotary Encoder dan kontrol | 15 | | | | |
| Gambar-2.8 | Profil induktansi untuk simulasi Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-demagnetizing | | | | | |
| Gambal-2.9 | untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 derajad 16 | | | | | |
| Gambar-2.10 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | 16 | | | | |

| | mode magnetizing-demagnetizing untuk sudut | |
|-------------|---|-----|
| | penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 | |
| | derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa | |
| | C (d) arus DC-link inverter | |
| Gambar-2.11 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | |
| | mode magnetizing-demagnetizing untuk sudut | |
| | penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 | |
| | derajad (a) arus fasa A (b) tegangan fasa A (c) | 4 - |
| 0 1 0 40 | tegangan fasa B (d) tegangan fasa C | 17 |
| Gambar-2.12 | Hasii simulasi kecepatan penggerak SRM dengan | |
| | konverter (n+1) mode magnetizing-demagnetizing | |
| | untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut | 17 |
| Combor 2.12 | Perilauanian 75 delajau Hasil simulasi panggarak SPM dengan kenyertar (n. 1) | 17 |
| Gambar-2.15 | masii simulasi penggerak SRM dengan konvener (II+T) | |
| | noue magnetizing-demagnetizing untuk sudut | |
| | deraiad (a) arus fasa Λ (b) arus fasa B (c) arus fasa | |
| | C. (d) arus DC-link inverter | 17 |
| Gambar-2.14 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | 17 |
| | mode magnetizing-demagnetizing untuk sudut | |
| | penvalaan 50 deraiad dan sudut pemadaman 75 | |
| | derajad (a) arus fasa A (b) tegangan fasa A (c) | |
| | tegangan fasa B (d) tegangan fasa C | 18 |
| Gambar-2.15 | Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan | |
| | konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk | |
| | sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 70 | |
| | derajad | 18 |
| Gambar-2.16 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | |
| | mode magnetizing-freewheeling untuk sudut | |
| | penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 70 | |
| | derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa | 40 |
| Combox 0.17 | C (d) arus DC-link inverter | 19 |
| Gambar-2.17 | Hasii simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | |
| | noue magnetizing-neewneeling untuk sudut | |
| | deraiad (a) arus fasa Δ (b) tegangan fasa Δ (c) | |
| | tegangan fasa B (d) tegangan fasa C | 19 |
| Gambar-2 18 | Hasil simulasi kecenatan penggerak SRM dengan | 10 |
| Cambal 2.10 | konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk | |
| | sudut penyalaan 50 deraiad dan sudut pemadaman 80 | |
| | derajad | 19 |
| Gambar-2.19 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | |
| | mode magnetizing-freewheeling untuk sudut | |
| | penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 80 | |
| | derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa | |
| | C (d) arus DC-link inverter | 20 |
| Gambar-2.20 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) | |
| | mode magnetizing-freewheeling untuk sudut | |
| | penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 80 | |
| | derajad (a) arus tasa A (b) tegangan tasa A (c) | ••• |
| | tegangan tasa B (d) tegangan tasa C | 20 |
| Gambar-2.21 | Prototip Switched Reluctance Motor pertama (SRM-1) | 21 |
| Gambar-2.22 | Prototip Switched Reluctance Motor kedua (SRM-2) | 21 |
| | | |

| Gambar-2.23 | Prototip Switched Reluctance Motor ketiga (SRM-3) | 21 |
|--------------------------|--|----------|
| Gambar-2.24 | Gambar-2.24 Prototip Switched Reluctance Motor keempat (SRM-4) beserta konverter (n+1) tiga fasa | 21 |
| Gambar-2.25 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter $(n+1)$ mode magnetizing-demagnetizing untuk x = -20 (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C | |
| Gambar-2.26 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter $(n+1)$ mode magnetizing-demagnetizing untuk untuk x | 22 |
| Gambar-2.27 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing- demagnetizing untuk untuk x = 20 (a) arus fasa A (b) tegangan fasa B | 23 |
| Gambar-2.28 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing- demagnetizing untuk untuk x = -20 (a) tegangan fasa A (b) tegangan fasa B (c) tegangan fasa C | 20 |
| Gambar-2.29 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk untuk x = 35 (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C | 23 |
| Gambar-2.30 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk untuk untuk $x = 35$ (a) arus DC-link inverter (b) arus fasa A | 24 |
| Gambar-2.31 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter $(n+1)$ mode magnetizing-freewheeling untuk untuk untuk $x = 35$ (a) tegangan fasa A (b) arus fasa A | 24 |
| Gambar-2.32 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk untuk untuk x = 35 (a) tegangan fasa A (b) tegangan fasa B (c) tegangan fasa C | 25 |
| | | |
| Gambar-3.1 Gambar-3.2 | Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa saat | 27 28 |
| Gambar-3.3 | Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar padam dan arus mengalir melalui R | 28 |
| Gambar-3.4 | Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa | 29 |
| Gambar-3.5 | Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat pengisian kapasitor Cd | 29 |
| Gambar-3.6 | konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat pembuangan muatan pada kapasitor Cd | 30 |
| Gambar-3.7 | Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar S2 dinyalakan dan tegangan kapasitor Cd | 20 |
| Gambar-3.8 | Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar S2 dinyalakan dan tegangan kapasitor Cd | 30 |
| Gambar-3.9 | Kurang dari tegangan sumber Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa | 30 31 |
| Gambar-3.10 | Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat pengisian kapasitor Cd | 31 |

| Gambar-3.11 | Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat proses freewheeling melalui transistor S4 | 32 |
|----------------------------|--|----|
| Gambar-3.12 | Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat menyalakan S2 untuk magnetisasi belitan fasa-B di mana tegangan | |
| Gambar-3.13 | Kapasitor Cd lebih besar dari tegangan sumber Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat menyalakan S2 untuk magnetisasi belitan fasa-B di mana tegangan kapasitar Cd labih kasil dari tegangan sumbar | 32 |
| Gambar-3.14 | Kapasitor Cullebin kecil dan tegangan sumber Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat komutasi belitan fasa-B | 33 |
| Gambar-3.15 | Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa | 34 |
| Gambar-3.16 | Gelombang tegangan kapasitor dan arus induktor pada konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa | 34 |
| Gambar-3.17 | Konverter jenis C-dump saat pembuangan energi yang tersimpan di belitan fasa menuju kapasitor C _d | 34 |
| Gambar-3.18 | muatan ke sumber | 35 |
| Gambar-5.19 | B dan tegangan kapasitor C_d lebih besar dari tegangan sumber | 35 |
| Gambar-3.20 | Konverter jenis C-dump saat proses magnetizing fasa B dan tegangan kapasitor C _d lebih kecil dari tegangan sumber | 35 |
| Gambar-3.21 | Konverter jenis C-dump dilengkapi dengan dumped energy recovery untuk SRM tiga fasa | 36 |
| Gambar-3.22 | Gelombang tegangan kapasitor dan arus induktor pada konverter jenis C-dump dilengkapi dumped energy recovery | 37 |
| Gambar-3 23 | Energi Efficient C-dump Converter tipe-1 | 37 |
| Gambar-3.24 | Hubungan antara induktansi fasa terhadap penyalaan saklar statis belitan motor | 38 |
| Gambar-3.25 | Mode Operasi-1 dari C-dump converter tipe energy efficient -1 (S1-S3-S4-D4) | 38 |
| Gambar-3.26 | Mode Operasi-2 dari C-dump converter tipe energy efficient -1 (S1-D3-D4-D5) | 38 |
| Gambar-3.27 | Mode Operasi-3 dari C-dump converter tipe energy efficient -1 (S1-D3-D5) | 39 |
| Gambar-3.28 | efficient -1 (S1-S4-D4) | 39 |
| Gambai-5.29 | efficient -1 (S1-S2-S4-D4) | 40 |
| Gambar-3.30 Gambar-3.31 | C-aump converter tipe energy efficient -2 Mode Operasi-1 dari C-dump converter tipe energy | 41 |
| Gambar-3.32 | efficient -2 (S1-S3-S4-D5) Mode Operasi-2 dari C-dump converter tipe energy | 41 |
| | efficient -2 (S1-D3-D4-D6) | 42 |
| Gambar-3.33 | Mode Operasi-3 dari C-dump converter tipe energy efficient -2 (S1-S4-D5) | 42 |

| Gambar-3.34 | Blok rangkaian penggerak SRM dengan konverter ienis C-dump | 43 |
|----------------------------|--|----------|
| Gambar-3.35 | Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump standar dengan tegangan | |
| Gambar-3.36 | kapasitor sebesar 200 Volt Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter jenis | 43 |
| Gambar-3 37 | 200 Volt (a) arus fasa (b) tegangan fasa Hasil simulasi koopatan penggerak SRM dengan | 44 |
| Gambar-3.57 | konverter jenis C-dump standar dengan tegangan kapasitor sebesar 300 Volt | 44 |
| Gambar-3.38 | Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump standar dengan tegangan kapasitor sebesar | 11 |
| Gambar-3.39 | Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #1 | 44 |
| Gambar-3.40 | Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #1 (a) arus | |
| Gambar-3.41 | fasa (b) tegangan fasa Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan | 45 |
| Gambar-3.42 | konverter jenis C-dump energy efficient #2 Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #2 (a) arus | 45 |
| | fasa (b) tegangan fasa | 46 |
| Gambar-3.43 Gambar-3.44 | Prototip penggerak SRM dengan C-dump converter Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1792 RPM (a) arus fasa (b) | 47 |
| Gambar-3.45 | tegangan fasa Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1792 RPM (a) tegangan | 47 |
| Gambar-3.46 | kapasitor (b) tegangan sumber Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1937 RPM (a) arus fasa (b) | 47 |
| Gambar-3.47 | tegangan fasa Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1937 RPM (a) tegangan | 48 |
| Gambar-3.48 | kapasitor (b) tegangan sumber Prototip penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 | 48 ⊿a |
| Gambar-3.49 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 1379 RPM (a) arus | |
| | fasa (b) tegangan fasa Hasil, pengujian, penggerak, SRM, dengan, C-dump | 49 |
| Gambar-3.50 | converter energy efficient #1 pada 1379 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber | 49 |
| Gambar-3.51 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 2066 RPM (a) arus | |
| Gambar-3.52 | fasa (b) tegangan fasa Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump | 50 |
| | tegangan kapasitor (b) tegangan sumber | 50 |
| Gambar-3.53 | Prototip penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 | 51 |

| Gambar-3.54 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1335 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa | 51 | | | | |
|----------------------------|--|----------|--|--|--|--|
| Gambar-3.55 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1335 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber | | | | | |
| Gambar-3.56 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1541 RPM (a) arus | 51 | | | | |
| Gambar-3.57 | Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1541 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber | 52 52 | | | | |
| Gambar-4.1 | Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa | 56 | | | | |
| Gambar-4.2 | Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa pada | 56 | | | | |
| Gambar-4.3 | Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa pada | 50 | | | | |
| Gambar-4.4 | Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa pada | 90 | | | | |
| Gambar-4.5 | mode demagnetizing Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) | 57 | | | | |
| Combor 4.0 | tegangan fasa (b) arus fasa | 57 | | | | |
| Gambar-4.6 | kecepatan acuan (b) kecepatan aktual | 57 | | | | |
| Gambar-4.7 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) $-$ (c) arus fasa (d) arus masukan pada sisi DC-link | 58 | | | | |
| Gambar-4.8 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) arus | 50 | | | | |
| Gambar-4.9 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) tegangan fasa (b) arus fasa | 58 58 | | | | |
| Gambar-4.10 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) | 50 | | | | |
| Gambar-4.1 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) – (c) arus fasa (d) arus masukan pada sisi DC-link | 59 59 | | | | |
| Gambar-4.12 | Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) arus | 50 | | | | |
| Gambar-4.13 | Penggerak motor switched reluctance berbasis kendali | 59 | | | | |
| Gambar-4.14 | Gelombang pada kendali SRM berbasis tegangan (a) | 60 | | | | |
| Gambar-4.15 | arus fasa (b) tegangan fasa (c) torka motor Penggerak motor switched reluctance berbasis kendali | 61 | | | | |
| Gambar-4.16 | arus Gelombang pada kendali SRM berbasis arus (a) arus fasa (b) tegangan fasa (c) torka motor | 61 | | | | |
| Gambar-4.17 | Blok diagram sistem penggerak SRM | 62 | | | | |
| Gambar-4.18 Gambar-4.19 | Konverter jenis asymmetric untuk penggerak SRM Gelombang tegangan fasa dan arus fasa pada | 63 | | | | |
| Gambar-4.20 | pensaklaran son switching Gelombang tegangan fasa dan arus fasa pada | 63 | | | | |
| Gambar-4.21 | Gelombang pada kendali berbasis tegangan (a) kecepatan referensi (b) kecepatan aktual (c) | 64 | | | | |

| | gelombang pensaklaran (d) arus fasa | |
|-------------|--|----------|
| Gambar-4.22 | Gelombang pada kendali berbasis arus (a) referensi arus (b) arus fasa (c) gelombang pensaklaran | 65 |
| Gambar-4.23 | Pengaruh posisi rotor terhadap induktansi stator pada switched reluctance motor (a) pergerakan rotor (b) | |
| | induktansi fasa | 66 |
| Gambar-4.24 | Pembangkitan torka positif dan torka negatif pada pada switched reluctance motor | 66 |
| Gambar-4.25 | Informasi posisi rotor yang dihasilkan melalui tiga buah sensor hall effect pada switched reluctance motor dan sinyal untuk pensaklaran konverter | 67 |
| Gambar-4.26 | Sinyal input capture (IC) yang dibangkitkan berdasarkan salah satu sinyal hall effect sensor | 67 |
| Gambar-4.27 | Dua proses input capture (IC) berdekatan yang terjadi sebelum TIMER INTERRUPT | 68 |
| Gambar-4.28 | Dua proses input capture (IC) berdekatan yang dipisahkan oleh TIMER INTERRUPT | 68 |
| Gambar-4.29 | Pensaklaran konverter untuk motor jenis SRM dengan dasar sinyal input capture (IC) | 69 |
| Gambar-4.30 | Pengontrolan lebar sudut eksitasi dari stator melalui input capture (IC) jika nilai X _{off} lebih besar dari X _{on} | 70 |
| Gambar-4.31 | Pengontrolan lebar sudut eksitasi dari stator melalui input capture (IC) jika nilai X _{on} lebih besar dari X _{off} | 70 |
| Gambar-4.32 | Flowchart untu menentukan jumlah pulsa TIMER yang dicapture oleh input capture (IC) | 71 |
| Gambar-4.33 | Flowchart untu membangkitkan gelombang pensaklaran dengan konverter asymmetric pada motor SRM berbasis oleh input capture (IC) | 72 |
| Gambar-4.34 | Prototip penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture | 73 |
| Gambar-4.35 | Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa- C | 73 |
| Gambar-4.36 | Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar (a) arus fasa (b) tagangan fasa | 70 |
| Gambar-4.37 | Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan unipolar (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa- | - 4 |
| Gambar-4.38 | C Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan | 74 |
| Gambar-4.39 | Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar & unipolar (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) | 74 |
| Gambar-4.40 | arus fasa-C Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan biodar & unipolar (a) arus fasa (b) tagangan fasa | 75 75 |
| Gambar-4.41 | Hasil pengujian perbandingan arus masukan sisi DC- link (a) pola bipolar (b) pola unipolar (c) pola bipolar- unipolar | 75 |
| Gambar-4.42 | Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Hall effect sensor (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untukpensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C | 76 |
| Gambar-4 43 | Gelombang arus saat penguijan pada penggerak | 76 |
| | e constant and caat poligajian pada poliggorati | |

| | motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Hall effect sensor (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C | |
|-------------|---|----|
| Gambar-4.44 | Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Hall effect sensor | 76 |
| Gambar-4.45 | Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM dengan deteksi hall effect sensor (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untu pensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C | 70 |
| Gambar-4.46 | Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untu pensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C | 77 |
| Gambar-4.47 | Gelombang arus saat pengujian pada penggerak motor SRM dengan deteksi hall effect sensor (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C | 78 |
| Gambar-4.48 | Gelombang arus saat pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa- | 78 |
| Gambar-4.49 | Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) | 70 |
| Gambar-4.50 | arus fasa-A (b) tegangan fasa-A Perbandingan gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka (a) melalui Input | 78 |
| | Capture (b) melalui hall effect sensor | 79 |

Motor Switched Reluctance

1.1 Dasar Motor Switched Reluctance

Motor Switched Reluctance (SRM) sebenarnya sudah dikenal sejak akhir abad 19 tetapi masih dalam rancangan yang sederhana. Secara struktur SRM sangat sederhana tetapi memiliki kerumitan dalam kendali untuk operasi. Selama beberapa dekade perkembangan SRM ini tidak mengalami kemajuan sehingga secara praktis tidak banyak dijumpai dalam aplikasi. Perkembangan yang sangat pesat dalam teknologi semikonduktor beserta kendali berbasis digital telah mendorong beberapa peneliti dan praktisi untuk menerapkan SRM dalam skala aplikasi. Bahhkan dewasa ini di mana isu tentang "green energy" mulai diterapkan, motor jenis SRM banyak diteliti dan dikembangkan sebagai penggerak listrik yang lebih efisien.

Torka pada SRM dihasilkan atas prinsip pengubahan fenomena reluktansi menjadi daya mekanik. Beberapa kondisi penting yang perlu diperhatikan adalah seluruh kutub stator dan kutub rotor tidak diijinkan untuk berada pada kondisi segaris (aligned) secara bersamaan karena pada kondisi ini tidak dihasilkan torka, dengan kata lain jumlah kutub stator dan jumlah kutub rotor tidak boleh sama. Torka SRM dibangkitkan atas dasar kecenderungan kutub rotor untuk sejajar (segaris) dengan kutub stator yang tereksitasi. Prinsip ini mengacu pada perbedaan reluktansi fluksi magnet antara posisi rotor yang segaris dan tak segaris ketika stator tereksitasi. Kondisi ini selanjutnya mengakibatkan dihasilkannya torka yang menarik rotor menuju posisi segaris. Motor jenis SRM terus dikembangkan karena memiliki beberapa keunggulan, di antaranya

- Memiliki inersia rotor rendah
- Rasio torka/inersia yang tinggi
- Rugi belitan hanya terjadi pada stator
- Struktur kuat karena tidak ada belitan atau magnet permanen pada rotor

 Dapat dioperasikan pada kecepatan sangat tinggi dan temperatur tinggi

Kekurangan SRM akibat konstruksi tanpa adanya magnet atau belitan pada rotor, di antaranya

- Karena hanya ada sumber eksitasi tunggal dan sifat kejenuhan magnet maka kerapatan daya (power density) dari SRM lebih rendah dibandingkan dengan motor magnet permanen (PM motor), selain itu rating KVA konverter yang digunakan semakin besar.
- Ketergantungan pada kejenuhan magnet dalam pembangkitan torka dan eksitasi gelombang persegi mengakibatkan karakteristik pengaturan SRM menjadi tidak linier.
- Konstruksi doubly-salient dan torka yang dihasilkan bersifat diskrit oleh masing-masing fasa mengakibatkan riak torka tinggi dibandingkan dengan mesin listrik lain.
- Terjadinya proses recovery energi medan magnet dalam motor menyebabkan riak arus pada catu DC masukan menjadi besar sehingga diperlukan kapasitor cukup besar sebagai tapis

Penyebab riak torka pada SRM meliputi

- Konstruksi kutub doubly-salient pada SRM
- Karakteristik magnet yang tak linear
- Konstruksi geometri motor
- Eksitasi stator terkonsentrasi di sekitar kutub stator
- Mode operasi
- Komutasi arus fasa

Riak torka pada SRM dapat diminimisasi dengan cara

- Desain rangkaian magnet motor
- Mengoperasikan dengan teknik pengaturan torka

Berbeda dengan mesin listrik berbasis medan magnet putar lain, pengaturan torka pada SRM tidak didasarkan pada "model reference control theory" seperti pengaturan berorientasi medan (field oriented control) melainkan dengan mengatur variabel kontrol mengacu pada fungsi perhitungan atau pengukuran. Dengan cara ini akan dihasilkan riak torka lebih rendah, pengurangan noise dan efisiensi lebih baik.

Dalam merancang SRM, beberapa hal penting menjadi catatan awal dalam menentukan spesifikasinya, yaitu daya keluaran (HP), kecepatan rotor (RPM), arus fasa (A) dan tegangan yang tersedia (V). Untuk torka (T) yang dihasilkan pada SRM, dengan mengetahui daya dan kecepatan motor akan dapat ditentukan sebagai berikut

$$T = \frac{P_{hp}.745,6}{2\pi \left(\frac{N}{60}\right)} = \frac{P_{kW}}{2\pi \left(\frac{N}{60}\right)} \text{Nm}$$
(1-1)

Pertimbangan lain yang perlu diperhatikan adalah penentuan jumlah stator dan rotor, hal ini akan berpengaruh pada konfigurasi konverter statis yang dipakai dan riak torka yang dihasilkan. Makin banyak jumlah kutub stator yang dipakai akan menambah jumlah saklar statis pada konverter.





Standar desain motor SRM umumnya memperhatikan faktor berikut

- Sudut busur kutub stator lebih kecil dari sudut busur kutub rotor (β_s 〈 β_r)
- ★ Zona torka efektif lebih kecil dari sudut kutub stator (β_s) dan lebih besar dari sudut stroke (\mathcal{E})

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\left(\frac{N_s}{2}\right)N_r}$$
(1-2)

Jika yang terjadi adalah $\beta_s \langle \varepsilon$ maka akan terdapat posisi rotor di mana motor tidak mampu melakukan starting awal. Sebagai contoh untuk 6/4 SRM maka diperoleh

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\left(\frac{N_{\rm s}}{2}\right)N_{\rm r}} = \frac{360^{\circ}}{\left(\frac{6}{2}\right).4} = \frac{360^{\circ}}{12} = 30^{\circ}$$
(1-3)

Untuk lebih jelsnya maka pada Gambar-1.2 ditunjukkan suatu SRM 6/4, jika stator A1-A2 sedang energized maka pada posisi setimbang tampak pada Gambar-1.2a. Selanjutnya stator B1-B2 energized maka posisi setimbang tampak pada Gambar-1.2b, selisih sudut antara posisi rotor antara Gambar-1.2a dan Gambar-1.2b adalah sebesar 30°.



Gambar-1.2 Besar stroke pada switched reluctance motor 6/4

Profil induktansi suatu SRM akan berulang setiap $(2\pi/N_r)$ radian. Pada Gambar-1.3 ditampilkan posisi antara rotor dan stator pada SRM, rotor bergerak secara transversal dari kiri ke kanan, mulai dari posisi unaligned ke posisi aligned dan kembali ke posisi unaligned lagi. Pergerakan dimulai pada saat $\theta = \theta_0$ (saat unaligned) menuju posisi $\theta = \theta_1$ (Gambar-4.5), gerakan ini menempuh sudut sebesar

$$\theta_1 - \theta_0 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2}$$
(1-4)

Pada saat busur rotor tidak overlap terhadap busur stator maka nilai induktansi fasa dapat dianggap berada pada nilai minimum (L_{min}), kondisi ini sering dinamakan kondisi di mana posisi rotor dan stator unaligned ($\theta_0 \rightarrow \theta_1$) dan kondisi di mana $\theta = \theta_0$ dinamakan fully unaligned. Saat awal overlap antara rotor dan stator dimulai dengan $\theta = \theta_1$, pergerakan posisi rotor menuju θ_2 akan

mengakibatkan nilai induktansi fasa meningkat secara linier hingga kondisi di mana $\theta = \theta_2$ (Gambar-1.5), pada kondisi ini sering dinamakan fully overlap dan nilai iduktansi fasanya sama dengan L_{max} . Selama interval $\theta_2 \le \theta \le \theta_3$ masih terjadi proses overlap antara rotor dan stator dengan demikian nilai induktansi fasanya konstan (Gambar-1.6). Nilai induktansi fasa menurun terjadi saat bagian rotor dan stator yang overlap mulai berkurang, yaitu terjadi saat $\theta_3 \le \theta \le \theta_4$ dan nilai minimum (L_{min}) terjadi pada $\theta = \theta_4$ (Gambar-1.7). pergerakan selanjutnya dari ($\theta_4 \rightarrow \theta_5$) akan memberikan nilai induktansi konstan pada nilai minimumnya (Gambar-1.8).



Gambar-1.3 Posisi aligned dan unaligned antara rotor-stator pada switched reluctance motor





Pergerakan rotor dari θ_0 ke θ_1 pada switched reluctance motor



Gambar-1.5

Pergerakan rotor dari θ_1 ke $\theta_2\,$ pada switched reluctance motor











Gambar-1.8 Pergerakan rotor dari $\, heta_4 \, {
m ke} \, \, heta_5 \,$ pada switched reluctance motor

Selama menempuh busur dari ($\theta_0 \rightarrow \theta_5$) maka nilai induktansi stator akan berubah dari nilai minimum ke nilai maksimum dan kembali ke nilai minimum lagi bergantung pada posisi rotor (Gambar-1.9). Besar sudut rotor dinyatakan oleh persamaan-persamaan di bawah

$$\theta_1 - \theta_0 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2}$$
(1-5)

$$\theta_2 - \theta_1 = \beta_s \tag{1-6}$$

$$\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s \tag{1-7}$$

$$\theta_4 - \theta_3 = \beta_s \tag{1-8}$$

$$\theta_5 - \theta_4 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \tag{1-9}$$



Gambar-1.9 Pengaruh posisi rotor terhadap nilai induktansi pada switched reluctance motor

1.2 Persamaan Torka Motor Switched Reluctance

Torka merupakan parameter yang sangat penting dalam mempelajari motor listrik. Untuk menyederhanakan rangkaian ekuivalen SRM maka efek kejenuhan magnet, fringing flux di sekitar ujung kutub, fluksi bocor dan mutual induktansi antar fasa diabaikan. Pada gambar di atas tampak rangkaian ekuivalen dari SRM yang terdiri dari tahanan fasa R dan EMF (e) dikenakan tegangan sebesar V pada belitan fasanya, sehingga persamaan tegangannya dinyatakan

$$v = R.i + e(\theta, i) = R.i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$$
(1-10)



Gambar-1.10 Rangkaian ekuivalen switched reluctance motor

R tahanan fasa

 $e(\theta, i)$ back EMF yang merupakan fungsi dari posisi rotor dan arus fasa

- i arus fasa
- λ fluksi lingkup

Karena fluksi lingkup (λ) merupakan fungsi θ dan i maka persamaan (1-10) dapat dinyatakan dengan

$$v = R.i + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}$$
(1-11)

Dengan menggunakan $\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)$. *i* maka

$$v = R.i + L(\theta)\frac{di}{dt} + \omega.i\frac{d}{d\theta}L(\theta)$$
(1-12)

Ketiga elemen ruas kanan dari persamaan di atas menunjukkan drop tegangan pada tahanan, drop tegangan pada induktansi dan gaya gerak listrik balik (EMF). Untuk menentukan torka maka persamaan (1-10) dikalikan dengan arus (i) dan dihasilkan persamaan daya sesaat pada SRM

$$v.i = R.i^2 + i.\frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$$
(1-13)

Ruas kiri pada persamaan (1-13) menunjukkan daya yang dikirimkan oleh sumber menuju SRM sedangkan elemen pertama ruas kanan persamaan (1-13) menunjukkan rugi daya ohmic pada belitan motor SRM serta elemen kedua persamaan tersebut merepresentasikan jumlah daya mekanik keluaran dan daya yang disimpan dalam medan magnet motor.

$$i\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt}$$
(1-14)

Karena daya merupakan perubahan energi terhadap waktu maka W_m dan W_f dapat dikatakan sebagai energi mekanik dan energi yang tersimpan dalam medan magnet. Dalam motor listrik, hubungan antara torka (T), kecepatan (ω) dan daya (P) sering dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{dW_m}{dt} = T.\omega = T.\frac{d\theta}{dt}$$
(1-15)

Sehingga persamaan (4-16) menjadi

$$i\frac{d\lambda}{dt} = T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt}$$
(1-16)

maka

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} = i \frac{d\lambda}{dt} - \frac{dW_f}{dt}$$
$$T = i \frac{d\lambda}{d\theta} - \frac{dW_f}{d\theta}$$
(1-17)

Dengan menggunakan konsep energi-coenergi dan mengambil sisetm dengan poros diam maka diperoleh hubungan persamaan energi (W_i) dan coenergi (W_c) medan magnet





$$W_{f} = \int_{0}^{\lambda} i(\theta, \lambda) d\lambda$$
 (1-18)

$$W_{c} = \int_{0}^{i} \lambda(\theta, i) \, di \tag{1-19}$$

Luas area penjumlahan energi dan coenergi medan magnet dapat dinyatakan dengan

$$W_f + W_c = \lambda i \tag{1-20}$$

Dengan melakukan diferensiasi persamaan di atas diperoleh

$$dW_f + dW_c = \lambda \, \mathrm{d}i + i \, \mathrm{d}\lambda \tag{1-21}$$

Dengan memasukkan persamaan (1-19) ke dalam (1-17) diperoleh

$$T = i \frac{d\lambda}{d\theta} - \frac{d(\lambda \, \mathrm{d}i + i \, \mathrm{d}\lambda - dW_c)}{d\theta}$$
$$T = \frac{d(-\lambda \, \mathrm{d}i + dW_c)}{d\theta}$$

Dengan mengasumsikan nilai arus (i) konstan maka persamaan di atas menjadi

$$T = \frac{dW_c}{d\theta} = \frac{d\left\{\left(\frac{1}{2}L(\theta)i\right)i\right\}}{d\theta}$$

$$T = \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta}$$
(1-22)

Mengacu pada persamaan di atas tampak bahwa torka yang dihasilkan oleh SRM tidak bergantung pada polaritas arus melainkan dipengaruhi oleh kemiringan induktansi belitan stator. Jika eksitasi arus stator diberikan saat kemiringan induktansi positif (induktansi naik) maka dihasilkan torka positif sedangkan jika eksitasi arus stator diberikan saat kemiringan induktansi negatif (induktansi turun) maka dihasilkan torka negatif. Kurva karakteristik torkakecepatan dari SRM dibagi menjadi 3 area menurut kecepatannya, yaitu : area constant torque, area constant power dan area falling power. Kecepatan maksimum tertinggi pada area constant torgue sering dinamakan base speed (wb) merupakan kecepatan saat arus maksimum dengan torka nominal pada tegangan nominal. Di bawah nilai base speed ini, torka motor dapat dijaga relatif konstan atau mengatur arus tetap fat-top (datar). Sedangkan pada kecepatan rendah akan terjadi arus fasa naik secara signifikan saat tegangan fasa diberikan akibat nilai back-EMF kecil. Untuk mengatasi kondisi ini dapat dilakukan pengaturan menggunakan hysteresis atau teknik PWM (Pulse Width Modulatian).









Karakteristik torka-kecepatan dari motor jenis SRM

Bab 2

SRM Drive dengan Konverter Jenis Miller

2.1 Topologi Konverter Jenis Miller

Suatu motor jenis SRM dapat menghasilkan torka positif atau negatif bergantung pada saat pemberian arus eksitasi pada belitan stator. Kemiringan induktansi stator dipengaruhi oleh posisi rotor, dengan demikian pemberian arus eksitasi belitan stator harus disesuaikan dengan posisi rotor. Begitu juga untuk mematikan arus, saat induktansi mulai menurun maka seharusnya arus sudah tidak lagi mengalir pada belitan stator. SRM memerlukan catu daya DC sebagai sumbernya, dengan menggunakan konverter statis maka aliran arus untuk eksitasi belitan stator dapat dilakukan. Dengan mengasumsikan suatu belitan fasa pada stator diberikan eksitasi saat posisi rotor tak sejajar (unaligned) atau pada nilai induktansi minimum. Maka akan terjadi beberapa mode rangkaian seperti gambar di bawah ini



Gambar-2.1 Rangkaian ekuivalen dengan kendali sudut pensaklaran pada switched reluctance motor (a) build-up mode (b) excitation mode (c) demagnetizing mode (d) freewheeling mode

Pengaturan sudut pensaklaran secara umum memiliki empat mode, yaitu ;

- Flat-top current build up : diawali pada nilai induktansi minimum akan terjadi kondisi pada nilai induktansi konstan sehingga dapat dianggap sebagai rangkaian RL sederhana tanpa back-EMF
- Excitation atau magnetizing : pada mode ini torka positif mulai dibangkitkan
- Demagnetizing : mode ditujukan untuk melakukan demagnetisasi rangkaian magnet
- Freewheeling : Pada mode ini arus fasa akan berkurang, dilakukan untuk mencapai rasio konversi energi mendekati satu (pada pengaturan SRM umumnya rasio konversi energi mendekati nilai 0,6-0,7) dan dilakukan dengan cara mengembalikan energi tidak ke sumber melainkan menjadi daya mekanik sebagai hasil kali back-EMF dan arus fasa. Metode ini sangat efektif untuk beban ringan.

Beberapa jenis konverter dapat digunakan untuk melakukan mode-mode eperasi di atas, di antaranya adalah jenis "one-switch" yang tiap fasanya terdiri dari satu dioda dan satu saklar statis atau jenis lainnya dengan kelebihan dan kekurangan.





Berbagai macam topologi konverter

Tabel-2.1 Perbandingan antar topologi konverter

| jenis | one-switch | asymmetric | bidirectional | full bridge | shared switch |
|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|
| Jumlah saklar | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| Jumlah dioda | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| Jumlah fasa | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| V-eksitasi | V _{dc} | V _{dc} | V _{dc} /2 | V _{dc} | V _{dc} |
| V- | V _{dc} | V _{dc} | V _{dc} /2 | V _{dc} | V _{dc} |
| demagnetisasi | | | | | |
| Arah arus | unidirectional | unidirectional | bidirectional | unidirectional | unidirectional |

2.2 Implementasi Konverter Jenis Miller untuk SRM 6/4

Pada penelitian ini digunakan konverter jenis (n+1) yang di dalamnya berisi "one-switch" converter. Untuk SRM 6/4 tiga fasa maka konverter tersebut terdiri dari empat dioda dan empat saklar statis. Pada Gambar-2.3 ditunjukkan skema konverter (n+1) untuk SRM 6/4 dengan belitan stator La, Lb dan Lc. Untuk excitation mode dari belitan fasa-a maka saklar statis yang menyala adalah Q1 dan Q4 (Gambar-2.4) sedangkan untuk freewheeling mode maka hanya saklar statis Q4 yang menyala (Gambar-2.5). untuk menurunkan arus dengan cepat dapat dipakai demagnetizing mode, yaitu dengan mematikan semua saklar (Gambar-2.6)



Gambar-2.3 Topologi konverter (n+1) untuk SRM



Gambar-2.4 Excitation mode pada topologi konverter (n+1) untuk SRM



Gambar-2.5 Freewheeling mode pada topologi konverter (n+1) untuk SRM



Gambar-2.6 Demagnetizing mode pada topologi konverter (n+1) untuk SRM

2.3 Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PSIM dengan mengacu pada Gambar-2.7 dengan motor jenis SRM (tahanan dalam motor sebesar 0,5 Ohm) dan konverter jenis (n+1) yang memiliki tegangan masukan sebesar 100 Volt, sedangkan profil induktansi mengacu pada Gambar-2.8. simulasi dilakukan dengan menggunakan dua kondisi, yaitu

- Konverter dioperasikan dengan mode magnetizing dan demagnetizing
- Konverter dioperasikan dengan mode magnetizing dan freewheeling



Gambar-2.7 Rangkaian untuk simulasi yang terdiri dari (n+1) konverter, SRM, Rotary Encoder dan kontrol



Gambar-2.8

Profil induktansi untuk simulasi

Pada Gambar-2.9 hingga Gambar-2.14 disajikan hasil simulasi untuk kecepatan motor, arus dan tegangan dengan mengoperasikan konverter untuk mode operasi magnetizing dan demagnetizing. Operasi dengan mode ini menyebabkan tegangan belitan stator berfluktuasi pada nilai positif dan negatif. Pengaturan besar sudut saat menyalakan dan mematikan saklar akan menentukan kecepatan putar motor.



Gambar-2.9

Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-demagnetizing untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 derajad



Gambar-2.10 Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C (d) arus DC-link inverter



Gambar-2.11 Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 65 derajad (a) arus fasa A (b) tegangan fasa A (c) tegangan fasa B (d) tegangan fasa C



Gambar-2.12

Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-demagnetizing untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 75 derajad



Gambar-2.13 Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 75 derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C (d) arus DC-link inverter





Sedangkan operasi konverter dengan mode magnetizing dan freewheeling ditunjukkan pada Gambar-2.15 hingga Gambar-2.20, tegangan stator yang disebabkan kondisi ini hanya memiliki polaritas positif sehingga untuk menurunkan arus memerlukan waktu lebih lama. Kendali yang diberikan untuk mengatur kapan saklar dinyalakan dan dimatikan menentukan arus mengalir dalam belitan stator. Jika arus mengalir saat gradien induktansi stator positif maka akan dihasilkan torka positif tetapi jika saat gradien induktansi stator negatif maka adanya arus akan mengakibatkan terjadinya torka negatif. Kecepatan motor akan ditentukan oleh selisih nilai kedua jenis torka ini.





Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 70 derajad



Gambar-2.16 Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingfreewheeling untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 70 derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C (d) arus DC-link inverter











Hasil simulasi kecepatan penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 80 derajad




Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingfreewheeling untuk sudut penyalaan 50 derajad dan sudut pemadaman 80 derajad (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C (d) arus DC-link inverter







2.4 Hasil Pengujian Laboratorium

Berikut ini disajikan prototip motor SRM yang dibuat beserta konverter jenis (n+1), empat buah motor ditampilkan sebagai hasil rancangan (Gambar-2.21 hingga Gambar-2.24). Dari hasil pengujian awal diperoleh motor SRM-4 memiliki unjuk kerja lebih baik sehingga pengujian lanjutan dilakukan pada motor jenis ini.



Gambar-2.21

Prototip Switched Reluctance Motor pertama (SRM-1)



```
Gambar-2.22
```

Prototip Switched Reluctance Motor kedua (SRM-2)



Gambar-2.23

Prototip Switched Reluctance Motor ketiga (SRM-3) beserta konverter (n+1) empat fasa



Gambar-2.24

Prototip Switched Reluctance Motor keempat (SRM-4) beserta konverter (n+1) tiga fasa

Hasil pengujian sementara dilakukan untuk melihat sejauh mana unjuk kerja motor. Pada Gambar-2.25 hingga Gambar-2.28 ditampilkan hasil pengujian pada motor SRM untuk pengamatan gelombang tegangan dan arusnya. Pengujian untuk mode operasi magnetizing dan demagnetizing tampak pada Gambar-2.25 hingga Gambar-2.28. Saat terjadi komutasi arus (pemadaman) maka nilai arus akan berkurang secara cepat karena tegangan belitan stator memiliki polaritas negatif.



Gambar-2.25

Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk x = -20 (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C



Gambar-2.26 Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk untuk x = -20 (a) arus DC-link inverter (b) arus fasa A



Gambar-2.27 Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk untuk x = -20 (a) arus fasa A (b) tegangan fasa B





Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingdemagnetizing untuk untuk x = -20 (a) tegangan fasa A (b) tegangan fasa B (c) tegangan fasa C

Pengujian untuk mode operasi magnetizing dan freewheeling tampak pada Gambar-2.29 hingga Gambar-2.32. Saat terjadi komutasi arus (pemadaman) maka nilai arus akan berkurang secara lambat karena tegangan belitan stator memiliki nilai nol (terhubung singkat melalui dioda freewheeling).





Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizing-freewheeling untuk untuk x = 35 (a) arus fasa A (b) arus fasa B (c) arus fasa C





Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingfreewheeling untuk untuk untuk x = 35 (a) arus DC-link inverter (b) arus fasa A







Gambar-2.32 Hasil pengujian penggerak SRM dengan konverter (n+1) mode magnetizingfreewheeling untuk untuk untuk x = 35 (a) tegangan fasa A (b) tegangan fasa B (c) tegangan fasa C

Bab 3

SRM Drive dengan Konverter Jenis C-Dump

3.1 Konverter Jenis R-Dump (R-Dump Converter)

Pada Gambar-3.1 di bawah ditunjukkan rangkaian konverter jenis R-dump dengan satu saklar dan satu dioda pada tiap fasanya. Besar nilai tahanan R akan menentukan besar rugi-rugi daya dan tegangan saklar. Umumnya, nilai R ditentukan dengan mempertimbangkan stress tegangan pada saklar statis (semakin besar nilai R akan semakin besar stress tegangan pada saklar) dan waktu turunnya arus saat padam atau falling time (makin besar nilai R akan semakin kecil nilai falling time). Pada saat saklar S₁ dipadamkan maka arus belitan fasa-A akan mengalami proses *freewheeling* melalui D₁, mengisi kapasitor C_d dan kemudian mengalir melalui tahanan R (Gambar-3.2) dan Gambar-3.3). Sebagian energi yang tersimpan pada belitan fasa-A akan terserap oleh tahanan R. Konverter jenis ini memiliki kelemahan di antaranya adalah bahwa arus belitan fasa akan membutuhkan waktu lebih lama untuk padam dibandingkan pengisian tegangan sumber, selain itu sebagian energi terdisipasi pada R sehingga akan mengurangi efisiensinya.



Gambar-3.1

Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.2 Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar padam dan mengisi kapasitor



Gambar-3.3

Konverter jenis R-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar padam dan arus mengalir melalui R

3.2 Konverter Jenis C-Dump (C-Dump Converter)

Konverter jenis ini sering dianggap sebagai konverter dengan catu daya bantu karena energi demagnetisasi dari fasa yang padam diberikan ke catu daya bantu yang merupakan kapasitor buangan (*dump capacitor*) untuk pemulihan atau digunakan untuk menyalakan belitan fasa sesudahnya (Gambar-3.4). Dengan mengasumsikan saat awal saklar S₁ dalam kondisi konduksi maka saat saklar tersebut dipadamkan, dioda D₁ akan dibias maju (*forward biased*) dan energi pada belitan fasa-A akan mengisi kapasitor C_d (Gambar-3.5). Jika tegangan kapasitor sudah mencapai nilai tertentu maka kelebihan energi pada kapasitor akan dibuang melalui L₄ dengan menyalakan saklar S₄ untuk menjaga tegangan kapasitor C_d berada pada nilai dua kali tegangan sumber ($2V_{dc}$) guna mempercepat proses demagnetisasi (Gambar-3.6). Selanjutnya saat saklar S₂ dinyalakan untuk eksitasi

fasa-B maka kapasitor akan dipakai sebagai sumber eksitasi (selama $v_{cap} \rangle V_{dc}$) seperti tampak pada Gambar-3.7, kemudian tegangan sumber akan memberikan eksitasi fasa-B saat $v_{cap} \langle V_{dc}$ (Gambar-3.8). Di sini saklar S₄ dioperasikan dengan frekuensi tinggi yang melebihi pensaklaran fasanya. Walaupun konverter jenis ini memiliki jumlah saklar yang lebih sedikit tetapi memiliki kemampuan untuk dioperasikan dengan kendali arus fasa secara bebas, mampu melakukan proses regeneratif serta proses demagnetisasi belitan fasa mampu dilakukan secara cepat selama komutasi. Walaupun demikian, konverter ini memiliki rugi tambahan akibat mengalirnya arus pada kapasitor C_d dan tegangan sumber sehingga menurunkan efisiensi.



Gambar-3.4

Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.5 Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat pengisian kapasitor Cd



Gambar-3.6 Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat pembuangan muatan pada kapasitor Cd



Gambar-3.7 Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar S2 dinyalakan dan tegangan kapasitor Cd melebihi tegangan sumber



Gambar-3.8 Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa saat saklar S2 dinyalakan dan tegangan kapasitor Cd kurang dari tegangan sumber

3.3 Konverter Jenis C-Dump dengan Transistor Freewheeling

Untuk mengatasi kelemahan konverter jenis C-dump maka modifikasi dilakukan dengan menghilangkan induktor L_4 dan memasang transistor T_4 sebagai freewheeling. Dengan mengasumsikan belitan fasa-A sedang energized (L1) maka untuk komutasi (pemadaman) dilakukan dengan membuka saklar S1 sehingga energi yang tersimpan pada belitan fasa-A akan dibuang untuk mengisi kapasitor C_d (Gambar-3.10). Jika tegangan kapasitor C_d melebihi nilai tegangan tertentu maka transistor S₄ akan dinyalakan sehingga terjadi proses freewheeling dan tegangan belitan fasa motor mendekati nol pada kondisi ini (Gambar-3.11). Jika tegangan kapasitor C_d sebesar v_o maka saat transistor S_4 konduksi, dioda D_4 akan reversed biased. Jika dalam kondisi ini, saklar S2 dinyalakan maka belitan fasa-B akan energized dengan tegangan vo (Gambar-3.12), selanjutnya saat tegangan vo lebih kecil dari tegangan sumber maka belitan fasa-B akan terhubung dengan tegangan sumber (Gambar-3.13). Komutasi fasa-B dilakukan dengan menggunakan tegangan -vo.





Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.10

Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat pengisian kapasitor Cd



Gambar-3.11 Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat proses freewheeling melalui transistor S4



Gambar-3.12 Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat menyalakan S2 untuk magnetisasi belitan fasa-B di mana tegangan kapasitor Cd lebih besar dari tegangan sumber



Gambar-3.13 Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat menyalakan S2 untuk magnetisasi belitan fasa-B di mana tegangan kapasitor Cd lebih kecil dari tegangan sumber



Gambar-3.14 Konverter jenis C-dump dengan freewheeling transistor untuk SRM tiga fasa saat komutasi belitan fasa-B

Kelebihan dari konverter jenis ini mencakup tidak adanya transfer energi dari motor menuju tegangan DC sumber dan terjadinya tegangan belitan fasa motor saat proses *freewheeling* memberikan fleksibilitas dalam pengendalian. Sementara kelemahan yang muncul meliputi keterbatasan operasi hanya pada mode *motoring*, rating S₄ lebih dari saklar-saklar fasa dan koordinasi antara saklar S₄ dan saklar fasa (S₁, S₂ dan S₃) selama proses komutasi dengan arus fasa *overlap* akan membatasi fleksibilitas kendali.

3.4 Konverter Jenis C-Dump dengan Resonant Energy Recovery

Pada Gambar-3.15 disajikan skema dari konverter jenis C-dump yang dilengkapi dengan resonant energy recovery. Pada saat salah satu belitan fasa dipadamkan (dimisalkan L₁ dengan mematikan S₁) maka energi yang tersimpan dalam medan magnet belitan fasa stator akan dibuang ke kapasitor C_d melalui thyristor T₁ (Gambar-3.17), meningkatnya nilai tegangan kapasitor C_d akan mempercepat turunnya arus belitan L₁. Pada akhir dari stroke SRM (posisi segaris antara kutub rotor dan kutub stator) maka seluruh energi sudah tersimpan di kapasitor. Untuk mengembalikan energi yang tersimpan pada kapasitor agar terkirim ke tegangan sumber V_{dc} maka thyristor T_4 dinyalakan, kapasitor C_d akan membuang muatannya menuju sumber melalui rangkaian resonan L4 (Gambar-3.18). Thyristor T₄ akan padam manakala arus yang mengalir melalui T₄ sama dengan nol, tetapi perlu diperhatikan bahwa selama proses aliran pada rangkaian resonan terjadi kondisi di mana thyristor T1, T2 atau T3 akan dibias maju saat tegangan kapasitor sama dengan tegangan DC sumber sehingga penggunakan thyristor sebagai pengganti dioda diperlukan. Jika pada saat tegangan kapasitor masih berada di atas nilai tegangan sumber V_{dc} dan saklar S_2 dinyalakan maka

belitan stator fasa B (L₂) akan *energized* dengan arus meningkat lebih cepat (Gambar-3.19), selanjutnya saat tegangan kapasitor sama dengan atau lebih kecil dari V_{dc} maka tegangan sumber akan mencatu belitan tersebut (Gambar-3.20).





Konverter jenis C-dump untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.16 Gelombang tegangan kapasitor dan arus induktor pada konverter jenis Cdump untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.17 Konverter jenis C-dump saat pembuangan energi yang tersimpan di belitan fasa menuju kapasitor C_d



Gambar-3.18 Konverter jenis C-dump saat kapasito C_d membuang muatan ke sumber



Gambar-3.19 Konverter jenis C-dump saat proses magnetizing fasa B dan tegangan kapasitor C_d lebih besar dari tegangan sumber





Konverter jenis C-dump saat proses magnetizing fasa B dan tegangan kapasitor C_d lebih kecil dari tegangan sumber

3.5 Konverter Jenis C-Dump dengan Dumped Energy Recovery

Konverter C-*dump* yang menggunakan rangkaian resonan memiliki kendala yaitu tegangan kapasitor C_d dapat berada di bawah nilai tegangan DC sumber (v_{cd} < V_{dc}). Salah satu faktor penting dalam konverter jenis C-dump bagaimana menjaga nilai tegangan kapasitor C_d selalu melebihi nilai tegangan DC sumber. Kondisi ini dapat dicapai dengan menghilangkan L₄, maka proses resonansi yang terjadi dapat dihindarkan. Salah satu metoda yang digunakan adalah dengan mengganti induktor L₄ dengan suatu resistor (R) seperti pada konverter jenis C-*dump* yang dilengkapi dengan *dumped energy recovery*. Walaupun resistor dapat mencegah menurunnya tegangan kapasitor C_d berada di bawah V_{dc} tetapi kapasitor menyerap energi yang dipulihkan tersebut. Bagian energi yang terserap oleh resistor merupakan fungsi dari tegangan sumber V_{dc} dan tegangan kapasitor v_{cd} setelah arus fasa menjadi nol. Persamaan energi yang dibuang dari kapasitor selama proses recovery

$$W_{cd} = \frac{1}{2} C_d \left(V_{cd}^2 - V_{dc}^2 \right)$$
(3-1)

Sedangkan energi yang diserap oleh resistor sebesar

$$W_{R} = \frac{1}{2} C_{d} (V_{cd} - V_{dc})^{2}$$
(3-2)

dengan menggabungkan kedua persamaan di atas maka perbandingan energi yang diserap resistor terhadap energi tersimpan pada kapasitor adalah

$$\rho = \frac{W_R}{W_{cd}} = \frac{V_{cd} - V_{dc}}{V_{cd} + V_{dc}}$$
(3-3)

Dengan mengacu persamaan di atas maka jika tegangan kapasitor saat *demagnetizing* bernilai dua kali tegangan DC sumber maka sepertiga energi yang tersimpan di kapasitor akan terdisipasi pada resistor.



Gambar-3.21 Konverter jenis C-dump dilengkapi dengan dumped energy recovery untuk SRM tiga fasa



Gambar-3.22 Gelombang tegangan kapasitor dan arus induktor pada konverter jenis Cdump dilengkapi dumped energy recovery

3.6 Konverter C-Dump Jenis Energy Efficient #1

Pada Gambar-3.23 ditunjukkan modifikasi dari konverter jenis C-*dump* (dinamakan *energy efficient C-dump converter*), perubahan terletak pada penempatan induktor L₄ dan dioda D₄ serta penambahan dioda D₅. Beberapa hal penting yang perlu diketahui dalam mengoperasikan konverter jenis ini adalah bahwa proses komutasi secara cepat belitan fasa dilakukan dengan memanfaatkan tegangan pada kapasitor C_d. Rangkaian komutasi terdiri dari belitan fasa, dioda (D₁, D₂ atau D₃), kapasitor dan dioda D₅, pada kondisi ini maka tegangan kapasitor akan naik. Untuk menjaga agar tegangan kapasitor berfluktuasi pada nilai tertentu maka dilakukan pembuangan muatan kapasitor melalui saklar S₄ dan induktor L₄.



Gambar-3.23 Energi Efficient C-dump Converter tipe-1

Dengan mengasumsikan bahwa proses pensaklaran antar fasa mengalami overlap (Gambar-3.24) maka beberapa mode operasi dapat diturunkan





Hubungan antara induktansi fasa terhadap penyalaan saklar statis belitan motor

Mode operasi-1 terjadi saat saklar S₁ dan S₃ mengalami ON secara bersamaan (sebelum S₃ padam, S₁ sudah menyala) sehingga akan mengalir arus fasa-A yang memproleh sumber dari tegangan V_{dc} dan arus fasa-C yang memperoleh energi dari kapasitor atau sebaliknya.







Gambar-3.26 Mode Operasi-2 dari C-dump converter tipe energy efficient -1 (S1-D3-D4-D5)

Setelah saklar S₃ padam, arus fasa-C akan mengalir melalui D₃ dan kapasitor C_d (pada kondisi ini energi pada belitan fasa-C dibuang ke kapasitor) sedangkan arus fasa-A tetap mengalir karena tegangan sumber V_{dc}. Arus induktor L₄ tetap mengalir hingga mati (Gambar-3.26). Setelah energi tersimpan pada L₄ habis maka akan terbentuk mode operasi-3 (Gambar-3.27). Untuk menjaga tegangan kapasitor berada pada rentang nilai tertentu maka diperlukan mode operasi-4 guna menurunkan tegangan kapasitor (Gambar-3.28) hingga akhirnya fasa-B dinyalakan.







Gambar-3.28 Mode Operasi-4 dari C-dump converter tipe energy efficient -1 (S1-S4-D4)





Beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk konverter jenis ini mencakup :

- Untuk memberikan tegangan pada belitan sebesar –V_{dc} maka diperlukan tegangan kapasitor sebesar V_{dc}
- Pembuangan muatan kapasitor dilakukan dengan pada belitan fasa (dapat satu belitan fasa atau dua belitan fasa)
- Untuk memberikan eksitasi pada belitan fasa maka digunakan saklar S₁, S₂ atau S₃. Mematikan saklar-saklar tersebut akan menyebabkan dioda dari fasa yang bersesuaian akan forward biased. Agar arus dapat berkurang secara cepat maka tegangan kapasitor setidaknya berada pada nilai tegangan sumber. Saat dioda konduksi terjadi pembuangan energi dari belitan fasa ke kapasitor sehingga tegangan kapasitor naik
- Segera setelah arus fasa mendekati nol, saklar S₄ harus dinyalakan untuk membuang muatan kapasitor agar nilai tegangannya berfluktuasi pada nilai tertentu. Dengan kata lain, saklar S₄ harus bekerja dalam interval saklar-saklar S₁, S₂ atau S₃ menyala.

3.7 Konverter C-Dump Jenis Energy Efficient #2

Konverter jenis C-*dump* jenis *energy efficient* #2 ini merupakan modifikasi dari konverter jenis C-*dump* yaitu dengan menghilangkan induktor serta menambahkan dioda D₆ yang bertujuan agar kapasitor C_d tidak terhubung paralel dengan sumber tegangan DC. Kapasitor C_d berfungsi untuk memberikan tegangan negatif pada belitan fasa yang akan dimatikan sehingga arus akan turun dengan cepat. Proses ini ditandai dengan mengalirnya arus fasa melalui dioda D₁, D₂ atau D₃. Pada akhir proses ini maka tegangan kapasitor akan naik. Untuk menurunkan tegangan kapasitor maka saklar S₄ akan dinyalakan sehingga muatan kapasitor C_d akan dibuang melalui belitan fasa. Keuntungan dari konverter jenis ini adalah tegangan kapasitor dapat digunakan untuk menyalakan belitan yang akan dihidupkan. Karena tegangan kapasitor lebih dari tegangan sumber maka proses penyalaan akan menghasilkan kenaikan arus lebih cepat. Operasi penggerak SRM dengan menggunakan konverter tipe ini mengacu pada Gambar-3.30 di mana terjadi *overlap* antar tiap fasa, yang berarti terjadi dua fasa *energized* bersamaan selama interval waktu tertentu.





Beberapa mode operasi dapat diturunkan dari konverter ini. Pada mode operasi-1 saat fasa A akan dinyalakan (dalam kondisi fasa-C masih menyala) maka pada kondisi ini saklar S₁ dan S₃ akan konduksi. Pada mode operasi ini tegangan $V_a = V_c$, karena $V_c > V_{dc}$ maka arus akan lebih cepat meningkat. Saat tegangan $V_c = V_{dc}$ maka akan terbentuk mode operasi-2, di mana belitan fasa-A mendapat sumber dari tegangan Vdc sementara fasa-C membuang energi ke dalam kapasitor. Untuk menjaga nilai tegangan kapasitor pada nilai tertentu maka proses pembuangan muatan kapasitor dilakukan (mode operasi-3 seperti pada Gambar-3.33).





Mode Operasi-1 dari C-dump converter tipe energy efficient -2 (S1-S3-S4-D5)



Gambar-3.32 Mode Operasi-2 dari C-dump converter tipe energy efficient -2 (S1-D3-D4-D6)

Pada mode operasi-6 tegangan Va = Vdc





3.8 Hasil Simulasi

Sebelum melakukan perancangan, simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PSIM dengan mengacu blok rangkaian seperti pada Gambar-3.34 sedangkan parameter untuk simulasi disajikan pada Tabel-3.1.

Tabel-3.1 Parameter untuk simulasi

| Tegangan sumber | 100 Volt |
|-----------------------|-----------------|
| SRM Stator & Rotor | 6 pole / 4 pole |
| Tahanan Stator | 0.5 Ohm |
| Induktansi Stator Max | 10 mH |
| Induktansi Stator Min | 1 mH |



Gambar-3.34 Blok rangkaian penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump

Simulasi untuk rangkaian konverter jenis C-dump standar mengacu pada rangkaian pada Gambar-3.4. Simulasi dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 100 Volt DC pada konverter tersebut. Selanjutnya gelombang kecepatan putar rotor, arus fasa dan tegangan fasa diamati. Kendali untuk konverter ini ditujukan agar nilai tegangan kapasitor diregulasi pada dua nilai tertentu (200 Volt dan 300 Volt). Hasil simulasi dengan konverter C-dump standar disajikan pada Gambar-3.35 hingga Gambar-3.38. Nilai kecepatan dengan menggunakan parameter tegangan kapasitor lebih besar akan menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih tinggi (Gambar-3.35 dan Gambar-3.36), kondisi ini disebabkan arus stator akan menurun lebih cepat jika digunakan tegangan kapasitor yang lebih tinggi (Gambar-3.38). Dari gambar tersebut juga tampak tegangan kapasitor akan memiliki polaritas negatif terhadap tegangan belitan stator sehingga cenderung melawan arus stator.



Gambar-3.35 Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump standar dengan tegangan kapasitor sebesar 200 Volt





Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump standar dengan tegangan kapasitor sebesar 200 Volt (a) arus fasa (b) tegangan fasa







Gambar-3.38

Hasil simulasi penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump standar dengan tegangan kapasitor sebesar 300 Volt (a) arus fasa (b) tegangan fasa

Simulasi kedua dilakukan dengan menggunakan rangkaian konverter Cdump jenis energy efficient #1 seperti ditunjukkan oleh Gambar-3.23. Kendali yang diterapkan pada rangkaian konverter ini ditujukan untuk mengendalikan motor SRM, tegangan kapasitor akan diregulasi untuk berada pada interval tertentu tetapi tidak pada frekuensi tinggi tetapi mengikuti frekuensi pensaklaran saklar-saklar fasanya. Hasil simulasi dengan konverter C-dump energy efficient #1 disajikan pada Gambar-3.39 dan Gambar-3.40.tegangan kapasitor akan diatur dengan penyalaan saklar S4.

Simulasi dengan menggunakan konverter C-dump energy efficient #2 dilakukan dengan mengacu rangkaian pada Gambar-3.30 dan hasilnya disajikan pada Gambar-3.41 dan Gambar-3.42. Konverter tipe ini mampu menghasilkan kecepatan paling tinggi dibandingkan dengan konverter C-dump standar dan energy efficient #1.





Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #1





Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #1 (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.41

Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #2



Gambar-3.42

Hasil simulasi kcepatan penggerak SRM dengan konverter jenis C-dump energy efficient #2 (a) arus fasa (b) tegangan fasa

3.9 Hasil Pengujian Laboratorium

Setelah melakukan simulasi maka tahap pengujian laboratorium dilakukan, melalui prototip yang dirancang pengukuran dibuat dengan menggunakan osciloscoupe untuk mengetahui bentuk gelombang arus dan tegangan. Kesesuaian dengan hasil simulasi akan dipaparkan dalam pembahasan. Pada Gambar-3.43 ditunjukkan prototip dari konverter jenis C-dump standar. Rangkaian daya mengimplementasikan saklar statis MOSFET IRFP 460 sebagai saklar statis dan dioda. Aplikasi MOSFET sebagai dioda dilakukan dengan menghubung-singkat terminal Gate-Emitor. Sebagai rangkaian driver digunakan TLP250 optocoupler. Pengujian dengan nilai tegangan kapasitor berbeda dilakukan pada tahap ini, Gambar-3.44 dan Gambar-3.45 menunjukkan hasil pengujian pada nilai tegangan kapasitor lebih rendah dari pengujian pada Gambar-3.46 dan Gambar-3.47. Penggunaan tegangan kapasitor lebih besar mengakibatkan arus stator menurun dengan cepat (arus fasa pada Gambar-3.46 akan menurun lebih cepat daripada arus fasa pada Gambar-3.44). Perbedaan antara tegangan kapasitor terhadap tegangan sumber untuk kedua kondisi ditunjukkan pada Gambar-3.44 dan Gambar-3.45.



Gambar-3.43

Prototip penggerak SRM dengan C-dump converter



Gambar-3.44

Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1792 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.45

Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1792 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber



Gambar-3.46

Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1937 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.47 Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter standar pada 1937 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber

Prototip kedua yang dirancang untuk pengujian laboratorium adalah konverter C-dump jenis energy efficient #1 seperti ditunjukkan pada Gambar-3.48. Saklar statis dan dioda diimplementasikan dengan MOSFET IRFP 460. Pengujian prototip ini jug dilakukan dengan menggunakan parameter tegangan kapasitor berbeda. Gambar-3.49 dan Gambar-3.50 menunjukkan hasil pengujian untuk tegangan kapasitor lebih kecil dibandingkan dengan hasil pada Gambar-3.51 dan Gambar-3.52. Pengujian dengan tegangan kapasitor lebih besar memberikan kecepatan putar rotor menjadi lebih besar.







Gambar-3.49

Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 1379 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa





Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 1379 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber





Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 2066 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.52 Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #1 pada 2066 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber

Prototip konverter ke-3 (Gambar-3.53) yang dibuat sebagai prototip untuk pengujian adalah konverter C-dump jenis energy efficient #2, konverter jenis ini tidak lagi menggunakan induktor seperti yang terdapat pada rangkaian konverter C-dump standar dan jenis energy efficient #1. Eliminasi elemen induktor menjadikan konverter C-dump jenis energy efficient #2 memiliki efisiensi lebih baik. Hasil pengujian dengan menggunakan dua parameter tegangan kapasitor berbeda ditunjukkan pada Gambar-3.54 dan Gambar-3.55 untuk satu nilai tegangan kapasitor lain yang lebih besar. Penggunaan tegangan kapasitor lebih besar mengkibatkan nilai kecepatan menjadi lebih besar.



Gambar-3.53

Prototip penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2



Gambar-3.54 Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1335 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.55

Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1335 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber





Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1541 RPM (a) arus fasa (b) tegangan fasa



Gambar-3.57 Hasil pengujian penggerak SRM dengan C-dump converter energy efficient #2 pada 1541 RPM (a) tegangan kapasitor (b) tegangan sumber

Untuk aplikasi sebagai penggerak listrik pada kendaraan maka diperlukan motor listrik yang mampu menghasilkan torka besar, mampu diatur kecepatannya secara linier dan memiliki efisiensi tinggi agar sekali pengisian batere mampu menempuh jarak cukup jauh. Motor SRM dengan kesederhanaan konstruksi, kokoh serta murah menjadikan jenis motor ini menjadi alternatif pilihan. Suatu konverter statis diperlukan untuk mengatur aliran daya dari sumber DC berupa batere menuju motor SRM. Melalui konverter ini akan dapat dikendalikan motor SRM begitu juga dengan unjuk kerjanya. Penggunaan konverter tipe asymmetric mampu mengoperasikan motor SRM dalam tiga mode operasi, yaitu : magnetizing, demagnetizing dan freewheeling.

Mode magnetizing akan menghubungkan belitan stator motor dengan batere sehingga menyebabkan arus stator meningkat, jika eksitasi ini diberikan saat gradien induktansi stator positif maka akan dihasilkan torka positif. Saat gradien induktansi stator negatif maka arus stator harus dimatikan segera untuk menghindarkan dibangkitknnya torka negatif. Operasi mode demagnetizing akan menghubungkan tegangan batere dengan polaritas terbalik ke belitan stator yang aktif (sedang energized) sehingga arus stator akan mati dengan cepat sedangkan penggunaan mode freewheeling akan memberikan tegangan nol pada belitan stator sehingga arus stator akan mati secara perlahan. Penggunaan tegangan negatif saat mematikan arus menjadi kunci bagaimana torka negatif dapat direduksi. Penggunaan saklar dengan jumlah lebih sedikit pada konverter akan mengurangi pada rugi daya dan biaya pembuatan konverter tetapi pembalikan polaritas tegangan DC masukan menjadi tidak mungkin. Dengan menambahkan kapasitor dalam rangkaian konverter maka akan diperoleh tegangan negatif dari kapasitor. Konverter yang memanfatkan tegangan kapasitor seperti ini sering dinamakan konverter jenis C-dump.

Pada hasil simulasi dan pengujian yang dipaparkan di atas menunjukkan bahwa nilai tegangan kapasitor akan berdampak pada bagaimana arus stator akan berkurang. Makin tinggi tegangan kapasitor akan membuat arus fasa makin cepat mati sehingga torka negatif yang dibangkitkan motor SRM dapat direduksi. Dengan membuat algoritma pemrograman pada perangkat digital sebagai rangkaian kontrol sedemikian hingga dihasilkan tegangan kapasitor pada level tertentu maka reduksi torka negatif dapat dilakukan.

Hasil rancangan prototip konverter dengan implementasi kendali digital berupa dsPIC30F4012 mampu memberikan hasil sesuai yang diharapkan. Sinyal kontrol dari kendali digital mampu diterjemahkan oleh rangkaian driver untuk memerintahkan saklar-saklar pada konverter bekerja. Chip yang dipakai juga mampu mengolah sinyal analog lebih cepat sehingga akurasi kendali menjadi lebih baik.

Bab 4

SRM Drive dengan Konverter Asymmetric

4.1 Topologi

Konverter jenis ini memiliki dua saklar statis dan dua dioda untuk tiap fasa nya (Gambar-4.1), karena tiap belitan fasa stator terhubung ke sumber tegangan DC melalui dua buah saklar maka rugi akibat jatuh tegangan pada saklar akan cukup signifikan untuk aplikasi pada tegangan rendah. Di sisi lain, konverter ini memiliki keunggulan yaitu pengontrolan fasa dapat dilakukan secara bebas tidak dipengaruhi fasa lain walaupun jumlah saklar keseluruhan lebih banyak. Mode operasi pada konverter ini ada tiga meliputi : magnetizing, demagnetizing dan freewheeling. Pada mode magnetizing, proses pemberian eksitasi untuk belitan fasa-A dilakukan dengan menyalakan saklar S₁ dan S₂. Pada kondisi ini tegangan belitan fasa-A akan sebesar tegangan masukan V_{dc} yang akan menghasilkan torka positif jika diberikan saat induktansi fasa-A meningkat (Gambar-4.1). Saat posisi rotor dan stator segaris (induktansi maksimum) maka arus stator harus dimatikan, proses komutasi dapat dilakukan dengan menggunakan mode freewheelingdengan menyalakan salah satu saklar, misalkan saklar S₁ saja atau S₂ saja untuk fasa-A (Gambar-4.2). Pada kondisi ini tegangan belitan fasa-A sama dengan nol sehingga arus akan berangsur turun dan akan menghasilkan torka negatif. Untuk mengurangi maka arus harus dimatikan dengan cepat melalui mode torka negatif *demagnetizing* (Gambar-4.3), yaitu dengan mematikan kedua saklar (saklar S₁dan S₂ untuk memadamkan fasa-A).

Dalam aplikasi, umumnya SRM dioperasikan untuk kecepatan yang dapat diubah, cara yang digunakan mengatur kecepatan motor SRM adalah dengan mengatur arus melalui pengaturan tegangan. Strategi modulasi lebar pulsa (PWM) umumnya digunakan untuk pengaturan kecepatan motor ini, saklar-saklar bagian atas dari konverter difungsikan untuk membentuk fungsi PWM sementara saklar-saklar bagian bawah difungsikan untuk komutasi.


Gambar-4.1

Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa



Gambar-4.2 Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa pada mode magnetizing





Konverter jenis asymmetric untuk SRM tiga fasa pada mode freewheeling





Konverter jenis ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan tegangan positif, negatif atau nol pada belitan motor sehingga dapat dioperasikan dengan pola tegangan bipolar ataupun unipolar.





Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) tegangan fasa (b) arus fasa





Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) kecepatan acuan (b) kecepatan aktual





Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) – (c) arus fasa (d) arus masukan pada sisi DC-link





Hasil simulasi pada pola pensaklaran bipolar (a) arus masukan pada sisi DClink (b) torka motor





Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) tegangan fasa (b) arus fasa





Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) kecepatan acuan (b) kecepatan aktual





Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) – (c) arus fasa (d) arus masukan pada sisi DC-link



Gambar-4.12 Hasil simulasi pada pola pensaklaran unipolar (a) arus masukan pada sisi DC-link (b) torka motor

4.2 Kendali Berbasis Arus dan Tegangan

Pengendalian penggerak listrik berbasis SRM mengenal dua konsep, yaitu pengendalian berbasis tegangan dan pengendalian berbasis arus. Dengan menggunakan dasar hubungan torka beban dan torka motor, maka akan diperoleh fakta bahwa percepatan dapat dihasilkan jika torka motor lebih besar dari torka beban $(T_m \ T_L)$ begitu pula sebaliknya perlambatan atau pengereman akan dihasilkan jika torka motor lebih kecil daripada torka beban $(T_m \ T_L)$.

Pada konsep penggerak motor SRM berbasis kendali tegangan maka tegangan diatur sedemikian hingga kecepatan mencapai nilai referensi. Kontroler kecepatan akan menghasilkan sinyal modulasi lebar pulsa yang mengatur tegangan motor sehingga mencapai kecepatan yang diinginkan. Kendali jenis ini memiliki nilai torka yang tidak presisi karena nilai arus tidak secara langsung diregulasi tetapi kendali jenis ini lebih sederhana dan murah (Gambar-4.13 dan Gambar-4.14).

Sedangkan pada penggerak motor SRM yang menerapkan kendali berbasis arus, maka nilai arus akan diregulasi pada nilai tertentu untuk mencapai kecepatan yang diinginkan (Gambar-4.15 dan Gambar-4.16). Torka yang dihasilkan pada konsep ini juga memiliki riak lebih baik.



Gambar-4.13 Penggerak motor switched reluctance berbasis kendali tegangan



Gambar-4.14 Gelombang pada kendali SRM berbasis tegangan (a) arus fasa (b) tegangan fasa (c) torka motor



Gambar-4.15 Penggerak motor switched reluctance berbasis kendali arus



Gambar-4.16 Gelombang pada kendali SRM berbasis arus (a) arus fasa (b) tegangan fasa (c) torka motor

Agar tegangan eksitasi dapat diberikan pada belitan stator SRM secara tepat maka diperlukan adanya informasi posisi rotor, metoda dengan pemakaian sensor atau tanpa sensor dapat dilakukan. Proses eksitasi dilakukan dengan bantuan suatu konverter statis, konverter ini akan menghubungkan tegangan DC ke belitan fasa yang akan dieksitasi.





Blok diagram sistem penggerak SRM

Salah satu topologi konverter yang sering digunakan pada penggerak SRM adalah jenis asymmetric converter. Konverter jenis ini memiliki dua buah dioda dan dua buah saklar statis untuk tiap fasa. Jika kedua saklar statis berada pada kondisi konduksi (ON) maka belitan fasa akan terhubung dengan tegangan sumber DC dengan polaritas positif (+V_{DC}). Penyalaan kedua saklar secara bersamaan selalu digunakan untuk mengawali eksitasi. Untuk mematikan atau menurunkan arus fasa

dapat dilakukan dengan mematikan kedua saklar statis secara bersamaan atau mematikan salah satu.



Gambar-4.18 Konverter jenis asymmetric untuk penggerak SRM

Pola pensaklaran secara soft-switching dilakukan untuk menghasilkan tegangan fasa yang memiliki polaritas tunggal (unipolar), pola pensaklaran ini akan mengakibatkan riak arus lebih kecil. Tegangan fasa pada pensaklaran demikian akan berfluktuasi dari nilai $+V_{DC}$ dan 0. Pola pensaklaran lain yang sering digunakan adalah hard-switching, di mana tegangan fasa akan berfluktuasi pada nilai $+V_{DC}$ dan $-V_{DC}$ (bipolar). Arus yang dihasilkan pada pola pensaklaran ini akan memiliki riak yang cukup besar.





Gelombang tegangan fasa dan arus fasa pada pensaklaran soft switching





Gelombang tegangan fasa dan arus fasa pada pensaklaran hard switching



Gambar-4.21 Gelombang pada kendali berbasis tegangan (a) kecepatan referensi (b) kecepatan aktual (c) gelombang pensaklaran (d) arus fasa



Gambar-4.22 Gelombang pada kendali berbasis arus (a) referensi arus (b) arus fasa (c) gelombang pensaklaran

4.3 Peningkatan Unjuk Kerja

Aplikasi motor listrik pada kendaraan listrik memerlukan fitur pengaturan kecepatan yang baik. Mengacu pada persamaan torka motor ini, pengaturan torka dilakukan dengan mengatur nilai arus yang mengalir pada belitan stator. Secara tidak langsung, dengan mengatur tegangan maka pengaturan kecepatan dapat dilakukan. Pola modulasi lebar pulsa (PWM) yang mengimplementasikan pensaklaran dengan duty cycle berbeda menjadi alternatif karena beberapa keunggulan. Pada konsep pengaturan berbasis tegangan maka nilai error akan menentukan lebar pulsa yang dikehendaki. Jika nilai error positif maka nilai duty cycle akan bertambah sedangkan saat nilai error negatif maka akan dihasilkan nilai duty cycle yang mengecil. Sedangkan pada kendali kecepatan berbasis arus maka nilai error negatif menyebabkan nilai referensi arus bertambah besar dan saat error negatif menyebabkan nilai referensi arus mengecil. Dalam motor listrik, unjuk kerja merupakan faktor sangat penting. Besar kecilnya torka serta kandungan riak menjadi salah parameter penting pada motor jenis SRM.

Pada Gambar-4.23 ditunjukkan suatu ilustrasi dari proses pergerakan rotor terhadap posisi stator yang disusun secara mendatar. Akibat perubahan posisi rotor terhadap stator maka nilai induktansi belitan stator akan berfluktuasi dari nilai minimum ke nilai maksimumnya. Pemberitan arus ke belitan stator atau proses eksitasi secara ideal hanya diberikan saat nilai induktansi meningkat atau secara fisik pada saat pergerakan rotor mendekati stator. Eksitasi demikian akan menghasilkan nilai torka positif. Pemberian eksitasi saat nilai induktansi menurun (posisi rotor menjauhi stator) akan menghasilkan torka negatif. Torka netto yang memutar rotor SRM merupakan selisih antara torka positif dikurangi torka negatif.

65

Dengan demikian diperlukan informasi posisi rotor yang harus disinkronisasikan dengan proses eksitasi. Dalam implementasi, deteksi posisi rotor sering direalisasikan dengan sensor hall effect yang diletakkan terpisah secara geometri pada rumah motor. Kelemahan yang muncul dengan menggunakan deteksi demikian adalah kemampuan deteksi hanya mampu pada sudut-sudut tertentu misalkan 30°, 60° atau kelipatannya.



Gambar-4.23 Pengaruh posisi rotor terhadap induktansi stator pada switched reluctance motor (a) pergerakan rotor (b) induktansi fasa



Gambar-4.24 Pembangkitan torka positif dan torka negatif pada pada switched reluctance motor

Pada Gambar-4.25 ditunjukkan pola sinyal pensaklaran yang dihasilkan oleh sensor hall effect. Sinyal pensaklaran yang dihasilkan S_A, S_B dan S_C belum tentu menghasilkan proses eksitasi yang tepat saat nilai induktansi stator meningkat. Dampak negatif yang muncul jika kendala terjadi adalah nilai torka yang dihasilkan tidak optimum. Pada penelitian ini dikembangkan suatu konsep memperbaiki nilai torka motor SRM yang belum optimum, yaitu dengan memanfaatkan kendali yang digunakan. Karena kendali diimplementasikan dengan chip digital jenis Digital Signal Processor (DSP) maka fasilitas yang tersedia dalam fitur dapat digunakan. Input Capture (IC) adalah salah satu fitur yang tersedia, dalam prosesnya Input Capture akan mengambil nilai sesaat dari nilai register TIMER (TMR). Jika salah satu keluaran sensor hall effect digunakan sebagai masukan bagi Input Capture maka saat dua sinyal hall effect berdekatan berubah dari LOW ke HIGH akan terjadi dua proses Input Capture (Gambar-4.26). Di sini akan dapat dihitung selisih nilai register TMR yang diambil, selisih ini adalah jumlah pulsa (sinyal) antara dua proses Input Capture.





Informasi posisi rotor yang dihasilkan melalui tiga buah sensor hall effect pada switched reluctance motor dan sinyal untuk pensaklaran konverter





Sinyal input capture (IC) yang dibangkitkan berdasarkan salah satu sinyal hall effect sensor

Dua kemungkinan yang terjadi saat dua proses Input Capture mengambil nilai register TMR, yaitu akan terjadi tanpa melewati nilai overflow (OV) dari TIMER atau dengan melewatinya. Jika kedua proses Input Capture terjadi tanpa melewati OV dari TIMER maka jumlah pulsanya ditentukan dengan persamaan

$$NP = X_1 - X_0 \quad \text{for } X_1 \rangle X_0 \tag{4-1}$$

Tetapi jika kedua proses Input Capture terjadi dengan melewati OV dari TIMER maka jumlah pulsanya ditentukan dengan persamaan

$$NP = X_1 + PR - X_0 \quad \text{for } X_1 \langle X_0 \tag{4-2}$$

di mana

NP = Jumlah pulsa antara kedua Input Capture yang berdekatan

X₁ = nilai register TMR yang diambil saat Input Capture kedua

X₀ = nilai register TMR yang diambil saat Input Capture pertama

PR = Perioda TIMER







Gambar-4.28 Dua proses input capture (IC) berdekatan yang dipisahkan oleh TIMER INTERRUPT

Selanjutnya nilai NP akan digunakan untuk membuat perhitungan secara terus menerus, jadi jumlah pulsa ini akan digunakan untuk menentukan posisi sudut dalam derajad dengan resolusi tinggi. Nilai inilah yang digunakan untuk menentukan sudut awal dan sudut akhir proses komutasi arus stator untuk ketiga fasanya (Gambar-4.29).



Gambar-4.29 Pensaklaran konverter untuk motor jenis SRM dengan dasar sinyal input capture (IC)

Penentuan sudut eksitasi stator untuk masing-masing fasa dapat ditentukan dengan menggunkan persamaan berikut

$$X_{on-ph(1)} = X_{on-ref} + \frac{k.NP}{6}$$
(4-3)

$$X_{on-ph(2)} = X_{on-ref} + \frac{(k+3)NP}{6}$$
 (4-4)

$$X_{off-ph(1)} = X_{off-ref} + \frac{k.NP}{6}$$
(4-5)

$$X_{off-ph(2)} = X_{off-ref} + \frac{(k+3)NP}{6}$$
(4-6)

di mana

ph = fasa-A, fasa-B dan fasa-C k = 0, 1, 2 $X_{on-ph(1)}$ = jumlah pulsa di mana awal eksitasi stator diberikan pertama kali

 $X_{on-ph(2)} =$ jumlah pulsa di mana awal eksitasi stator diberikan kedua kali $X_{off-ph(1)} =$ jumlah pulsa di mana awal eksitasi stator dimatikan pertama kali

 $X_{off-ph(2)} =$ jumlah pulsa di mana awal eksitasi stator dimatikan kedua kali $X_{on-ref} =$ jumlah pulsa referensi terhadap awal eksitasi stator saat diberikan $X_{off-ref} =$ jumlah pulsa referensi terhadap awal eksitasi stator saat dimatikan



Gambar-4.30 Pengontrolan lebar sudut eksitasi dari stator melalui input capture (IC) jika nilai X_{off} lebih besar dari X_{on}





Eksitasi pada stator dapat diberikan pada interval di antara dua proses Input Capture yang berdekatan atau di dalam suatu proses Input Cature, sehingga untuk menentukan pulsa atau sinyal eksitasi dapat ditentukan dengan persamaan berikut

if
$$X_{on-ph} \langle NP$$
 then $Y_1 = 1$ else $Y_1 = 0$

if
$$X_{off-ph} \rangle NP$$
 then $Y_2 = 1$ else $Y_2 = 0$
 $S = Y_1 \cap Y_2$ (4-7)
atau
 $S = Y_1 \bigcup Y_2$ (4-8)

Dengan mengacu pada uraian dan analisis di atas maka diagram alir dari proses penentuan eksitasi stator dapat digambarkan pada Gambar-4.23 dan Gambar-4.33.



Gambar-4.32 Flowchart untu menentukan jumlah pulsa TIMER yang dicapture oleh input capture (IC)



Gambar-4.33 Flowchart untu membangkitkan gelombang pensaklaran dengan konverter asymmetric pada motor SRM berbasis oleh input capture (IC)

Untuk memberikan validasi atas kendali yang dipaparkan di atas maka berikut disajikan hasil pengujian laboratorium melalui prototip yang telah dirancang (Gambar-4.34). Gambar-4.35 hingga Gambar-4.41 ditampilkan guna membuktikan kendali motor SRM berbasis kendali arus. Pola pensaklaran berbeda diberikan untuk membandingkan kualitas gelombang tegangan dan arus motor yang nantinya akan berpengaruh terhadap unjuk kerja. Pada Gambar-4.35 dan Gambar-4.36 merupakan hasil pengujian dengan pola tegangan bipolar. Tegangan akan berfluktuasi pada nilai positif dan negatif, kondisi ini berdampak arus akan naik dan

turun dengan cepat yang mengakibatkan arus fasa memiliki riak cukup besar. Penggunaan tegangan unipolar ditampilkan pada Gambar-4.37 dan Gambar-4.38 melalui mode magnetisasi dan freewheeling. Dengan pola pensaklaran ini maka dihasilkan riak arus fasa lebih kecil tetapi saat komutasi (pergantian dari fasa satu ke fasa lainnya) akan berlangsung lebih lambat karena turunnya arus fasa yang lambat. Untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik maka digunakan kombinasi pola tegangan bipolar dan unipolar. Pada saat tracking arus maka digunakan pola unipolar sedangkan saat komutasi antar fasa digunakan pola bipolar (Gambar-4.39 dan Gambar-4.40). Sedangkan perbandingan arus masukan sisi DC-link konverter disajikan pada Gambar-4.41.



Gambar-4.34

Prototip penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture





Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C





Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar (a) arus fasa (b) tagangan fasa









Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan unipolar (a) arus fasa (b) tagangan fasa



Gambar-4.39 Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar & unipolar (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C



Gambar-4.40 Hasil pengujian untuk perbaikan riak dengan tegangan bipolar & unipolar (a) arus fasa (b) tagangan fasa



Gambar-4.41

Hasil pengujian perbandingan arus masukan sisi DC-link (a) pola bipolar (b) pola unipolar (c) pola bipolar-unipolar





Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Hall effect sensor (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untukpensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C









Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Hall effect sensor (a) arus fasa-A (b) tegangan fasa-A

Dalam praktis umumnya motor jenis SRM dilengkapi dengan sensor hall-effect untuk mengetahui informasi posisi rotor yang diperlukan guna sinkronisasi pensaklaran konverter. Sensor hall effect ini terpasang pada bagian bodi dari stator, di mana masing-masing sensor diletakkan tergeser 120 derajad listrik. Ketidakpresisian peletakan secara geometris akan mempengaruhi unjuk kerja motor. Guna mengantisipasi kondisi ini maka akan diterapkan metoda dengan menggunakan fasilitas Input Capture yang tersedia pada mikrokontroller. Uraian tentang konsep ini dijelaskan pada deskripsi di atas.



Gambar-4.45 Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM dengan deteksi hall effect sensor (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untu pensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C



Gambar-4.46

Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) sinyal Hall effect (b) – (d) pulsa untu pensaklaran fasa-A fasa-B dan fasa-C





Gelombang arus saat pengujian pada penggerak motor SRM dengan deteksi hall effect sensor (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C



Gambar-4.48 Gelombang arus saat pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) arus fasa-A (b) arus fasa-B (c) arus fasa-C





Gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka melalui Input Capture (a) arus fasa-A (b) tegangan fasa-A



Gambar-4.50 Perbandingan gelombang pengujian pada penggerak motor SRM untuk meningkatkan torka (a) melalui Input Capture (b) melalui hall effect sensor

Daftar Pustaka

- 1. Ahn J. W., "Switched Reluctance Motor", Kyungsung University Korea
- Asgar M., Afjei E., Siadatan A. and Zakerolhosseini A., (2009). A new modified asymmetric bridge drive circuit switched reluctance motor, 2009 European Conference on Circuit Theory and Design, pp.539-542
- Babu B. P. and Jayan M. V., (2017). A high efficiency novel C-dump topology based converter for SRM, 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), pp.1170-1175
- Bagherian H., Asgar M. and Afjei E., (2011). A new C-dump converter for bifilar winding switched reluctance motor, 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, pp.467-472
- Banerjee R., Sengupta M. and Dalapati S., (2014). Design and implementation of current mode control in a switched reluctance drive, 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp.1-5
- Bharathi S. B. and Shanthi L. J. S., (2016). Comparative evaluation on converters of SRM drive under various loading conditions, 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), pp.358-363
- 7. Cabezuelo D., Andreu J., Kortabarria I., Ibarra E. and Garate I., (2017). SRM converter topologies for EV application: State of the technology, 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.861-866
- 8. Cai J. and Deng Z., (2014). Switched-Reluctance Position Sensor. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, Issue 11, pp.1–4
- Chen Y. Y., Hsu T. C., Hu K. W. and Liaw C. M., (2015). On the PFC AC-DC converter fed SRM drives with reversible and regenerative braking capabilities, 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), pp.1-7
- 10. Chithrabhanu A. and Vasudevan K., (2017). Online compensation for torque ripple reduction in SRM drives, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference, pp.1-6
- Deshpande V. V. and Lim J. Y. (2002), "New Converter Configurations for SwitchedReluctance Motors Wherein Some WindingsOperate on Recovered Energy", IEEE Transc. on Industry Applications, Vol.38, No.6, pp.1558-1565, Nov/Dec 2002
- DiRenzo, M. T.,(2000) "Switched Reluctance Motor Control Basic Operation and Example Using the TMS320F240" Texas Instruments Application Report SPRA420A -February 2000
- Emadi A., Lee Y. J., Rajashekara K., (2008) "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transc. on IndustrialElectronics, Vol.55, No.6, pp.2237-2245, June 2008

- 14. Faradjizadeh F., Tavakoli M. R., Salehnia M. and Afjei E., (2014). *C-Dump converter* for Switched Reluctance Generator, The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), pp.597-603
- Frieske B., Kloetzke M. and Mauser F., (2013). Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles, 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), pp.1-12
- Gan C., Wu J., Hu Y., Yang S., Cao W. and Kirtley J., (2015). Online Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using One Current Sensor, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.31, Issue 10, pp. 7248 – 7263
- Ghani M. R. A., Farah N. and Tamjis M. R., (2016). *Field oriented control of 6/4 SRM for torque ripple minimiaztion*, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), pp.4418-4424
- Goto H., Murakami S. and Ichinokura O., (2015). Design to maximize torque-volume density of axial-flux SRM for in-wheel EV, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 005191 – 005196
- Khedkar P. and Swami P. S., (2017). Comparative study of asymmetric bridge and split AC supply converter for switched reluctance motor, 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), pp.522-526
- Lee D. H., Pham T. H. and Ahn, J.W. (2013). Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.60, No.9, pp.3637–3643.
- 21. Li H. and Yue L., (2009). Speed Control of Switched Reluctance Motor by FVSC System, 2009 WRI Global Congress on Intelligent, pp.521-525
- Lulhe M. and Date T. N., (2015). A technology review paper for drives used in electrical vehicle (EV) & hybrid electrical vehicles (HEV), 2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), pp. 632 – 636
- 23. Mademlis C. and Kioskeridis I., (2008). Four-quadrant smooth torque controlled switched reluctance machine drive, 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Pp.1216-1222
- Makwana J. A., Agarwal P. and Srivastava S. P., (2011). Novel simulation approach to analyses the performance of in-wheel SRM for an Electrical Vehicle, 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, pp. 1 – 5
- 25. Mohamadi M., Rashidi A., Saghaiannezhad S. M. and Ebrahimi M., (2017), *Modified quasi Z-Source Converter for Switched Reluctance Motor Drive*, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2017), Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- 26. Moron C., Garcia A., Tremps E. and Somolinos J. A.,(2012). Torque Control of Switched Reluctance Motors, IEEE Transactions on Magnetics, 48(4), pp.1661–1664
- Nanda A. B., Pati S., Rani N. and Panda D., (2016). A novel torque ripple minimization strategy for a 6/4 SRM drive with reduced switching frequency variation, 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp.1-6

- Nikam S. P., Rallabandi V. and Fernandes B. G., (2006) "A High-Torque-Density Permanent-Magnet FreeMotor for in-Wheel Electric Vehicle Application", IEEE Transc. on Industry Applications, Vol.42, No.5, pp.1216-1221, Sept/Oct 2006
- Peng F., Ye J. and Emadi A., (2017), An Asymmetric Three-Level Neutral Point Diode Clamped Converter for Switched Reluctance Motor Drives, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 11, pp. 8618 – 8631
- Prasobh P. and Sindhu V., (2017). SRM driven electrical vehicle simulation using MATLAB, 2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT), pp.1-5
- Qu Z., Wang H., Tang S., Wei X. and Chen Q., (2017). A new hybrid asymmetric and buck-boost fronted converter for SRM with active boost voltage capability, 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp.1-6
- Rahman K. M., Fahimi B., Suresh G., Rajarathnam A. V. And Ehsani M., (2000) "Advantages of Switched Reluctance MotorApplications to EV and HEV: Designand Control Issues", IEEE Transc. on Industry Applications, Vol.36, No.1, pp.111-121, Jan/Feb 2000
- Riyadi S. (2014), "Operating a Four-Leg PWM Converteras a Three-Phase Controlled Current Source", The 1st Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, pp.74-78, Indonesia 2014
- Riyadi S., (2017), Determination of the Conduction Angle for Switched Reluctance Motor Drive, The 4th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, UNDIP SemarangRodriguez F. And Emadi A., (2007) "A Novel Digital Control Technique forBrushless DC Motor Drives", IEEE Transc. on IndustrialElectronics, Vol.54, No.5, pp.2365-2373, Oct 2007
- Riyadi S. (2018). Control Strategy for Switched Reluctance Motor With Rotary Encoder Based Rotor Position Detection, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol.16, No.3, pp.261-270Sadeghi S. and Mirsalim M. (2010), "Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series HybridElectric Vehicle", Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 7, No. 1, 2010
- Shao J., (2012) "An Improved Microcontroller-Based SensorlessBrushless DC (BLDC) Motor Drivefor Automotive Applications", IEEE Transc. on Industry Applications, Vol.48, No.6, pp.2287-2295, Nov/Dec 2012
- Singh S. K. and Tripathi R. K., (2013). *Minimization of torque ripples in SRM drive* using DITC for electrical vehicle application, 2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp.1-5
- Tomczewski K. and Wrobel K., (2014), Improved C-dump Converter for Switched Reluctance Motor Drives, IET Power Electronics, Vol. 7, Issue. 10, pp. 2628 – 2635
- Tseng K. J., Cao S. and Wang J. (2007) "A New Hybrid C-Dump and Buck-Fronted Converterfor Switched Reluctance Motors", IEEE Transc. on Industrial Electronics, Vol.47, No.6, pp.1228-1236, Oct 2007
- Veena N. D. and Raghuram N. L., (2017). Minimization of torque ripple using DITC with optimum bandwidth and switching frequency for SRM employed in electric vehicle, 2017 International Conference on Smart Grids, Power and Advanced Control Engineering (ICSPACE), pp.143-148

- 41. Ye J., Bilgin B. and Emadi A., (2015). *An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.30, No.2, pp.726–735A
- Ying M. and Zaiping P., (2010). A Novel Starting Method of Sensorless BLDC Motors for Electric Vehicles, 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, pp. 3212 – 3215
- 43. Zhang C., Wang K., Zhang S., Zhu X. and Quan L., (2016), *Analysis of Variable Voltage Gain Power Converter for Switched Reluctance Motor*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 7, 0610905