

Buku Ajar  
**DASAR TEKNIK ELEKTRO**

**Slamet Riyadi**  
Program Studi Teknik Elektro  
Universitas Katolik Soegijapranata  
Semarang



# ***BUKU AJAR DASAR TEKNIK ELEKTRO***

*Penulis :  
Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi, MT.*

## ***BUKU AJAR DASAR TEKNIK ELEKTRO***

### **PENULIS**

Prof. Dr. Ir. Slamet Riyadi, MT.

Program Studi Teknik Elektro

Soegijapranata Catholic University (SCU)

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis dan Penerbit.

ISBN	: 978-623-5997-45-2 (PDF)
Desain Sampul	: Hartoyo SP
Perwajahan Isi	: Hartoyo SP
Ukuran buku	: (17,6 cm x 24,9 cm)
Font	: Minion Pro 12
Tanggal Terbit	: Oktober 2023
Hak Cipta	: ©Universitas Katolik Soegijapranata 2023

### **PENERBIT**

Universitas Katolik Soegijapranata

Anggota APPTI No. 003.072.1.1.2019

Anggota IKAPI No 209/ALB/JTE/2021

Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur Semarang 50234

Telpon (024)8441555 ext. 1409

Website: [www.unika.ac.id](http://www.unika.ac.id)

Email Penerbit: [ebook@unika.ac.id](mailto:ebook@unika.ac.id)

# PRAKATA

Puji syukur kami ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena Buku Ajar dengan judul Dasar Teknik Elektro telah dapat diselesaikan. Buku ini disusun berdasarkan pemikiran Penulis yang telah lama dikaji dan diteliti. Tujuan dipublikasikan buku ini agar para mahasiswa Teknik Elektro di semester awal dapat mengenal teknologi ini, selain itu buku ini dapat digunakan mahasiswa program studi di luar teknik elektro yang membutuhkan dasar pengetahuan terkait.

Kegiatan belajar mengajar di bidang Teknik Elektro menuntut peran aktif para dosen dalam mengembangkan wawasan keilmuannya mengingat perkembangan disiplin teknik elektro yang begitu pesat. Buku yang berisi dasar-dasar keilmuan teknik elektro membutuhkan materi yang berkualitas sehingga mampu memberikan pondasi kepada mahasiswa. 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 dasar-dasar untuk bidang teknik elektro. Melalui pemahaman dasar, para mahasiswa diharapkan dapat mendapatkan landasan dalam mempelajari bidang teknik elektro secara lebih sistematis dan lebih detil. Buku ini berisi dasar teori tentang rangkaian listrik dan analisisnya, dasar motor listrik jenis motor DC, dasar penyearah serta dua motor modern yaitu motor brushless DC dan motor switched reluctance.

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. Simulasi dapat dilakukan untuk melakukan verifikasi dan melakukan perancangan sederhana.



# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA</b>		iii
<b>PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU</b>		iv
<b>DAFTAR ISI</b>		v
<b>DAFTAR GAMBAR</b>		ix
<b>DAFTAR TABEL</b>		xix
<b>BAB 1</b>	<b>Dasar Rangkaian Listrik</b>	1
1.1	Pendahuluan	1
1.2	Elemen Rangkaian	1
1.3	Hukum Ohm	5
1.4	Hukum Kirchhoff	8
1.5	Resistansi Seri dan Pembagi Tegangan	10
1.6	Resistansi Paralel dan Pembagi Arus	11
1.7	Transformasi Delta-Wye dan Sebaliknya	12
1.8	Latihan	13
	Daftar Pustaka	20
<b>BAB 2</b>	<b>Mesh Current dan Node Voltage</b>	21
2.1	Pendahuluan	21
2.2	Metoda Mesh Current	21
2.3	Metoda Node Voltage	24
2.4	Latihan	27
	Daftar Pustaka	35
<b>BAB 3</b>	<b>Teorema Superposisi, Thevenin dan Norton</b>	37
3.1	Pendahuluan	37
3.2	Teorema Superposisi	37
3.3	Teorema Thevenin	40
3.4	Teorema Norton	43
3.5	Latihan	45
	Daftar Pustaka	53



<b>BAB 4</b>	<b>Dasar Motor DC</b>	55
4.1	Motor DC	55
4.2	Jenis Motor DC	58
4.3	Belitan pada Motor DC	60
4.4	Latihan	72
4.5	Tugas	75
	Daftar Pustaka	75
<b>BAB 5</b>	<b>Dasar Elektronika Daya</b>	77
5.1	Pendahuluan	77
5.2	Konverter	78
5.3	Saklar Statis	85
	5.3.1 Dioda	86
	5.3.2 Thyristor	87
	5.3.3 Bipolar Junction Transistor (BJT)	89
	5.3.4 Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor (MOSFET)	89
	5.3.5 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	90
5.4	Latihan	91
	Daftar Pustaka	94
<b>BAB 6</b>	<b>Penyearah Dioda Satu Fasa</b>	95
6.1	Pendahuluan	95
6.2	Penyearah dioda satu fasa setengah gelombang	96
6.3	Penyearah dioda gelombang tipe full-bridge	98
6.4	Latihan	111
	Daftar Pustaka	113
<b>BAB 7</b>	<b>Motor Brushless DC</b>	115
7.1	Dasar Motor BLDC (Brushless DC)	115
7.2	Penggerak Motor BLDC	118
7.3	Pengereman Regeneratif pada Motor BLDC	120
	Daftar Pustaka	125





<b>BAB 8</b>	<b>Motor Switched Reluctance</b>	129
8.1	Dasar Mesin Switched Reluctance	129
8.2	Operasi SRM pada Kuadran 1	131
	Daftar Pustaka	143
	<b>Biodata Penulis</b>	145



**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**

# DAFTAR GAMBAR

Gambar-1.1	Simbol sumber tegangan beban (independent voltage source)	2
Gambar-1.2	Simbol sumber arus beban (independent current source)	3
Gambar-1.3	Pengiriman dan penyerapan energi pada sumber tegangan beban (independent voltage source)	3
Gambar-1.4	(a) Voltage Controlled Voltage Source (VCVS) dan (b) Current Controlled Voltage Source (CCVS)	4
Gambar-1.5	(a) Voltage Controlled Current Source (VCCS) dan (b) Current Controlled Current Source (CCCS)	4
Gambar-1.6	Rangkaian tertutup dengan sumber tegangan DC dan beban resistor	7
Gambar-1.7	Polaritas tegangan pada resistor	7
Gambar-1.8	Gelombang tegangan dan arus saat diberikan arus DC	7
Gambar-1.9	Gelombang tegangan dan arus saat diberikan arus AC	8
Gambar-1.10	Hubungan arus pada titik percabangan	9
Gambar-1.11	Hubungan tegangan pada lintasan tertutup	9
Gambar-1.12	Dua buah resistansi yang dihubungkan secara seri	10
Gambar-1.13	Dua buah resistansi yang dihubungkan secara paralel	11
Gambar-1.14	Transformasi dari rangkaian delta ke rangkaian wye	12
Gambar-1.15	Transformasi dari rangkaian wye ke rangkaian delta	12
Gambar-1.16	Rangkaian untuk Latihan-1.1	13
Gambar-1.17	Rangkaian untuk Latihan-1.2	14
Gambar-1.18	Rangkaian untuk Latihan-1.3	15
Gambar-1.19	Rangkaian untuk Latihan-1.4	15
Gambar-1.20	Rangkaian untuk Latihan-1.5	17
Gambar-1.21	Rangkaian untuk Latihan-1.6	19
Gambar-2.1	Rangkaian dengan tiga buah <i>loop</i> untuk analisis mesh current	22
Gambar-2.2	Rangkaian dengan dua buah <i>loop</i>	23



Gambar-2.3	Hubungan tegangan dan arus	24
Gambar-2.4	Pengaruh perubahan arah arus terhadap persamaan	25
Gambar-2.5	Rangkaian dengan sumber arus dan sumber tegangan untuk analisis <i>Node Voltage</i>	25
Gambar-2.6	Rangkaian dengan satu sumber arus dan tiga buah sumber tegangan untuk analisis <i>Node Voltage</i>	26
Gambar-2.7	Rangkaian untuk Latihan-2.1	27
Gambar-2.8	<i>Node</i> dan tegangan tiap ujung resistansi pada rangkaian untuk Latihan-2.1	27
Gambar-2.9	Rangkaian untuk Latihan-2.2	28
Gambar-2.10	Rangkaian untuk Latihan-2.3	29
Gambar-2.11	Rangkaian untuk Latihan-2.4	30
Gambar-2.12	Rangkaian untuk Latihan-2.5	32
Gambar-2.13	Rangkaian untuk Latihan-2.6	33
Gambar-2.14	Rangkaian untuk Latihan-2.7	35
Gambar-3.1	Rangkaian dengan dua buah sumber tegangan	38
Gambar-3.2	Rangkaian ekuivalen dengan menghilangkan tegangan $V_2$	38
Gambar-3.3	Arus yang mengalir pada rangkaian akibat tegangan $V_1$	39
Gambar-3.4	Rangkaian ekuivalen dengan menghilangkan tegangan $V_1$	39
Gambar-3.5	Arus yang mengalir pada rangkaian akibat tegangan $V_2$	40
Gambar-3.6	Arus dan tegangan pada rangkaian akibat tegangan $V_1$ dan $V_2$	40
Gambar-3.7	Rangkaian yang akan dianalisis dengan teorema Thevenin	41
Gambar-3.8	Rangkaian dengan $R_2$ dihilangkan	41
Gambar-3.9	Rangkaian dengan $R_2$ dan $V_2$ dihilangkan	42
Gambar-3.10	Rangkaian dengan $R_2$ dan $V_1$ dihilangkan	42
Gambar-3.11	Rangkaian tanpa sumber tegangan untuk menentukan $R_{th}$	43
Gambar-3.12	Rangkaian ekuivalen Thevenin dengan $R_2$ terpasang	43



Gambar-3.13	Menghubung singkat terminal a-b untuk menentukan arus Norton	44
Gambar-3.14	Resistansi R2 dihubungkan dengan rangkaian ekuivalen Norton	44
Gambar-3.15	Rangkaian untuk Latihan-3.1	45
Gambar-3.16	Menentukan tegangan Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1	46
Gambar-3.17	Menentukan resistansi Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1	46
Gambar-3.18	Rangkaian ekuivalen Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1	47
Gambar-3.19	Rangkaian untuk Latihan-3.2	47
Gambar-3.20	Rangkaian untuk Latihan-3.3	50
Gambar-4.1	Prinsip motor DC	55
Gambar-4.2	Bagian motor DC (a) rotor (b) stator dengan belitan	56
Gambar-4.3	Rangkaian ekuivalen motor DC penguatan terpisah	57
Gambar-4.4	Motor DC penguatan terpisah (a) rangkaian ekuivalen (b) kurvakarakteristi	59
Gambar-4.5	Motor DC penguatan seri (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik	59
Gambar-4.6	Motor DC penguatan shunt (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik	60
Gambar-4.7	Motor DC penguatan Compound (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik	60
Gambar-4.8	Commutator Pitch	61
Gambar-4.9	Pole Pitch dan Coil Pitch	62
Gambar-4.10	Belitan jangkar (a) lap winding (b) wave winding	62
Gambar-4.11	Kumparan (coil) memiliki dua sisi dan terdiri dari 3 lilitan konduktor	62
Gambar-4.12	Pemasangan belitan pada segmen komutator dan posisi sikat	63
Gambar-4.13	Sebuah kumparan dengan dua sisi yang terdiri dari tiga konduktor	63
Gambar-4.14	Rotor motor DC dengan 8 buah slot dan 8 segmen komutator	64



Gambar-4.15	Struktur belitan pada rotor dengan 8 slot, 8 segmen komutator dan 2 kutub magnet	65
Gambar-4.16	Representasi kumparan pada slot	65
Gambar-4.17	Kumparan-kumparan membentuk belitan yang merupakan rangkaiantertutup	66
Gambar-4.18	Representasi belitan rotor terhadap medan magnet stator	67
Gambar-4.19	Aliran arus pada belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-8/1 dan segmen komutator-4/5	67
Gambar-4.20	Rangkaian ekuivalen belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator1/8 dan segmen komutator-4/5	68
Gambar-4.21	Motor DC dengan 11 slot, 4 kutub magnet	69
Gambar-4.22	Hubungan 2 sisi kumparan dengan coil pitch = 3 dan commutator pitch = 5	69
Gambar-4.23	Belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet	70
Gambar-4.24	Rangkaian ekuivalen belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet	71
Gambar-4.25	Aliran arus dari 2 sikat pada belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet	71
Gambar-4.26	Rangkaian ekuivalen belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet saat sikat menyentuh segmen komutator 2/3 dan 5/6	72
Gambar-4.27	Aliran arus pada belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-4 dan segmen komutator-8	72
Gambar-4.28	Rangkaian ekuivalen belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator 4 dan segmen komutator-8	73
Gambar-4.29	Hubungan kumparan pada rotor motor DC dengan 4 slot dan 2 kutub magnet	74
Gambar-5.1	Prinsip dan fokus elektronika daya	78
Gambar-5.2	Konverter dasar dalam disiplin elektronika daya	79
Gambar-5.3	Penyearah dioda (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan (c) tegangan keluaran	80



Gambar-5.4	Penyearah terkendali sudut fasa (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan (c) tegangan keluaran	81
Gambar-5.5	Chopper jenis step-down (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan dan tegangan keluaran (c) kendali untuk saklar	81
Gambar-5.6	Chopper jenis step-up (a) skema rangkaian (b) tegangan masukandan tegangan keluaran (c) kendali untuk saklar	82
Gambar-5.7	Chopper jenis step-up/down (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan dan tegangan keluaran saat menurunkan tegangan (c) tegangan masukan dan tegangan keluaran saat menaikkan tegangan	83
Gambar-5.8	Inverter (a) topologi standar (b) topologi multilevel	84
Gambar-5.9	Tegangan keluaran inverter gelombang persegi	84
Gambar-5.10	Tegangan keluaran inverter sinusoidal (a) setelah ditapis (b) sebelum ditapis	85
Gambar-5.11	Tegangan keluaran inverter jenis multileve	85
Gambar-5.12	Dioda (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal	86
Gambar-5.13	Dioda saat turn-off	86
Gambar-5.14	Thyristor (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal	87
Gambar-5.15	Implmentasi thyristor pada penyearah terkendali sudut fasa jenis halfbridge	88
Gambar-5.16	Gelombang pada penyearah terkendali sudut fasa jenis half-bridge (a)tegangan sumber (b) arus thyristor (c) arus gate	88
Gambar-5.17	Bipolar Junction Transistor (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal	89
Gambar-5.18	MOSFET (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal	90
Gambar-5.19	IGBT (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal	90
Gambar-5.20	(a) arus pada sisi keluaran saklar statis jenis fully-controlled (b) pulsa kendali	91
Gambar-5.21	Dioda (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi	92
Gambar-5.22	Pemberian tegangan pada Bipolar Junction Transistor	92



Gambar-5.23	Bipolar Junction Transistor (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi	93
Gambar-5.24	Koneksi anti-paralel antara Bipolar Junction Transistor dan dioda (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi	94
Gambar-6.1	Penyearah dioda satu fasa setengah gelombang melalui transformator	96
Gambar-6.2	Gelombang pada penyearah dioda satu fasa setengah gelombang (a) tegangan sumber (b) tegangan keluaran (c) arus keluaran	96
Gambar-6.3	Gelombang pada penyearah dioda satu fasa setengah gelombang (a) tegangan sumber (b) tegangan pada dioda	97
Gambar-6.4	Penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber)	98
Gambar-6.5	Gelombang pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber) (a) tegangan sumber (b) arus sumber (c) tegangan keluaran (d) arus keluaran	99
Gambar-6.6	Gelombang pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber) (a) tegangan sumber (b) arus dioda D1 dan D4 (c) arus dioda D2 dan D3	100
Gambar-6.7	Penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif dan rangkaian ekuivalennya	100
Gambar-6.8	Tegangan sumber dan arus dioda pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif	101
Gambar-6.9	Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval $t_1 \leq t \leq t_2$	101
Gambar-6.10	Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval $t_2 \leq t \leq t_3$	102
Gambar-6.11	Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval $t_3 \leq t \leq T$	102
Gambar-6.12	Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval $t_0 \leq t \leq t_1$	103





Gambar-6.13	Gelombang tegangan dan arus pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (a) tegangan sumber (b) arus sumber (c) arus keluaran (d) tegangan induktor (e) tegangan keluaran	103
Gambar-6.14	Penyearah dioda dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran	104
Gambar-6.15	Penyederhanaan penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran	104
Gambar-6.16	Tegangan dan arus pada penyearah dioda (full-bridge) yang dilengkapi tapis $C = 10.000 \mu\text{F}$ dan $R = 5 \text{ Ohm}$ (a) tegangan sumber (b) tegangan DC keluaran (c) arus sumber (d) tegangan terminal sumber	105
Gambar-6.17	Gelombang tegangan dan arus pada penyearah dioda (full-bridge) yang dilengkapi tapis C pada beberapa mode operasi	106
Gambar-6.18	Mode-1 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran	107
Gambar-6.19	Mode-2 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran	107
Gambar-6.20	Mode-3 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran	108
Gambar-6.21	Tegangan kapasitor penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran di mana $C_1$ lebih besar dari $C_2$	109
Gambar-6.22	Nilai kapasitansi lebih besar menyebabkan lama konduksi dioda menjadi lebih pendek	110
Gambar-6.23	Gelombang pada penyearah dioda yang dilengkapi tapis $C = 10.000 \mu\text{F}$ dan beban $R = 5 \text{ Ohm}$ (a) tegangan DC keluaran (b) tegangan terminal sumber dengan THD = 11,7% (c) arus sumber dengan THD = 66,3%	110
Gambar-6.24	Gelombang pada penyearah dioda yang dilengkapi tapis $C = 1.000 \mu\text{F}$ dan beban $R = 5 \text{ Ohm}$ (a) tegangan DC keluaran (b) tegangan terminal sumber dengan THD = 6,8% (c) arus sumber dengan THD = 47,8%	111
Gambar-6.25	Penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif	112



Gambar-6.26	Gelombang pada penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif (a) tegangan sumber (b) tegangan keluaran (c) arus masukan	112
Gambar-7.1	Rangkaian ekuivalen motor BLDC tiga fasa beserta inverter	116
Gambar-7.2	Kurva karakteristik torka terhadap kecepatan dari motor BLDC	117
Gambar-7.3	Bagian stator dan rotor dari motor BLDC (a) kondisi setimbang saat fasa-A dan fasa B menjadi kutub magnet utara – selatan (b) kondisi setimbang saat fasa-A dan fasa C menjadi kutub magnet utara – selatan	118
Gambar-7.4	Urutan langkah dalam satu siklus untuk motor BLDC tiga fasa	118
Gambar-7.5	Gelombang ideal pada keenam langkah motor BLDC tiga fasa (a) arus fasa (b) tegangan fasa	119
Gambar-7.6	Rangkaian ekuivalen saat S1 – S2 konduksi untuk merealisasikan step-2	119
Gambar-7.7	Blok penggerak listrik berbasis motor BLDC	120
Gambar-7.8	Generator BLDC dan penyearah tiga fasa	122
Gambar-7.9	Tegangan keluaran generator BLDC dan tegangan keluaran penyearah tiga fasa	122
Gambar-7.10	Terminal A-B dari generator BLDC pada sektor-1	123
Gambar-7.11	Mode operasi chopper pada sektor-1	123
Gambar-7.12	Diagram alir untuk menentukan sektor	124
Gambar-7.13	Diagram alir untuk operasi regenerative braking motor BLDC	125
Gambar-8.1	Motor switched reluctance dengan 12 kutub stator dan 8 kutub rotor (12/8 SRM)	130
Gambar-8.2	Konverter jenis asymmetric 3 fasa untuk motor switched reluctance	130
Gambar-8.3	Kuadran operasi untuk mesin switched reluctance	131
Gambar-8.4	Profil induktansi belitan stator fasa-A terhadap sudut rotor dan sinyal eksitasi dalam operasi mesin switched reluctance sebagai motor	132



Gambar-8.5	Rangkaian SIMULINK untuk menentukan profil induktansi mesin switched reluctance	133
Gambar-8.6	Hasil injeksi tegangan pada stator mesin switched reluctance untuk menentukan profil induktansi (a) sudut rotor (b) arus stator	133
Gambar-8.7	Operasi mesin switched reluctance sebagai motor putaran maju (a) posisi sudut rotor (b) kecepatan rotor	134
Gambar-8.8	Operasi mesin switched reluctance sebagai motor putaran maju (a) posisi sudut rotor (b) arus impuls	134
Gambar-8.9	Onverter jenis asymmetric tiga fasa sebagai penggerak mesin switched reluctance tipe 6/4 sebagai motor putaran maju	135
Gambar-8.10	Profil mesin switched reluctance tipe 6/4 sebagai motor putaran maju, sudut rotor terhadap stator masing-masing fasa dan status saklar S1 hingga S6	136
Gambar-8.11	Blok mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK	136
Gambar-8.12	Kurva magnetisasi mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK	137
Gambar-8.13	Kurva magnetisasi mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK	137
Gambar-8.14	Blok Multiport Switch pada SIMULINK	138
Gambar-8.15	Blok kontrol KOMUTASI FASA untuk mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor	139
Gambar-8.16	Rangkaian untuk simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK	140
Gambar-8.17	Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi sudut rotor (b) sinyal keluaran Blok KOMUTASI FASA	141
Gambar-8.18	Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi sudut rotor (b) arus fasa	141
Gambar-8.19	Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) tegangan fasa (b) arus fasa	141



Gambar-8.20	Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi rotor terhadap stator fasa-A (b) arus-arus fasa	142
Gambar-8.21	Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi rotor terhadap stator fasa-A (b) tegangan fasa-A (c) tegangan fasa-B (d) tegangan fasa-C	142
Gambar-8.22	Hasil simulasi kecepatan mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK	142



# DAFTAR TABEL

Tabel-1.1	Besaran-besaran listrik	38
Tabel-3.2	Tegangan dan arus pada resistansi akibat $V_2$	39
Tabel-3.3	Tegangan dan arus pada resistansi akibat $V_1$ dan $V_2$	40
Tabel-4.1.	Penyajian hubungan antar kumparan yang membentuk belitan motor DC jenis lap winding dengan 8 slot dan 2 kutub magnet	66
Tabel-4.2.	Penyajian hubungan antar kumparan yang membentuk belitan motor DC jenis wave winding dengan 8 slot dan 2 kutub magnet	70
Tabel-7.1	Urutan berputar motor BLDC	120
Tabel-7.2	Konduksi dioda pada penyearah tiga fasa untuk generator BLDC	122
Tabel-8.1	Hubungan antara sinyal keluaran dari Blok Fungsi pada SIMULINK terhadap terminal-terminal Gate untuk operasi motor putaran maju	139
Tabel-8.2	Pensaklaran pada konverter asymmetric terhadap posisi rotor untuk operasi motor putaran maju	140



**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**

## Dasar Rangkaian Listrik

### 1.1 PENDAHULUAN

Rangkaian listrik merupakan satu mata kuliah yang sangat diperlukan dalam melakukan analisis terkait bidang keahlian teknik elektro. Penguasaan analisis rangkaian mutlak diperlukan dalam melakukan kajian, perancangan dan implementasi rangkaian-rangkaian dalam bidang teknik elektro. Pemahaman tentang hukum Ohm, hukum Kirchhoff dan hubungan rangkaian menjadi landasan yang wajib dimiliki dalam memperdalam analisis rangkaian listrik. Oleh karena itu dalam bab ini kedua hukum tersebut akan dijadikan topik bahasan

### 1.2 ELEMEN RANGKAIAN

Rangkaian listrik dapat didefinisikan sebagai kumpulan elemen listrik yang dihubungkan sehingga membentuk rangkaian tertutup. Sedangkan elemen rangkaian listrik dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok di antaranya adalah

**Elemen berkutub dua** : memiliki dua buah terminal pada kedua ujungnya → resistor, induktor, kapasitor, dll

**Elemen berkutub lebih dari dua** : memiliki terminal lebih dari dua → transistor, OP-AMP, MOSFET, dll

**Elemen Pasif** : elemen yang tidak mampu menghasilkan energi

Hanya mampu menyerap energi → resistor (R)

Mampu menyimpan energi

dalam bentuk medan magnet → induktor (L)

dalam bentuk medan listrik → kapasitor (C)

**Elemen Aktif:** elemen yang mampu menghasilkan energi → batere, generator, dll

Dalam rangkaian listrik juga dikenal sumber dan beban, di mana suatu sumber dapat didefinisikan sebagai sesuatu yang mampu mencatu arus atau tegangan, sumber ini tidak lain adalah merupakan elemen aktif. Sedangkan beban adalah suatu elemen rangkaian listrik yang dikenai arus/tegangan dari sumber. Suatu beban umumnya merupakan elemen pasif. Sumber dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori, di antaranya

Sumber beban (independent source), dibedakan atas

Sumber tegangan

Sumber arus

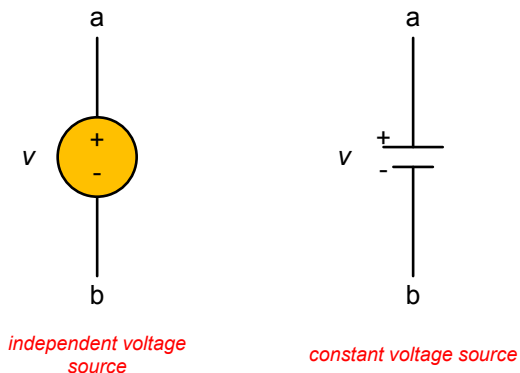
Sumber tak beban (dependent source)

Sumber tegangan

Sumber arus

### Sumber Tegangan Bebas (Independent Voltage Source)

Merupakan elemen berkutub dua yang mampu menyediakan dan menjaga tegangan yang konstan pada kedua terminalnya tidak terpengaruh pada besarnya arus yang mengalir (misalkan : batere dan generator).



Gambar-1.1 Simbol sumber tegangan bebas (independent voltage source)

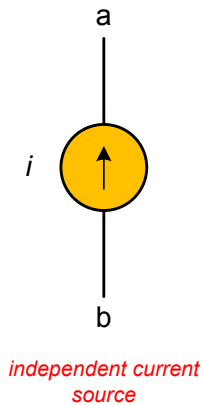




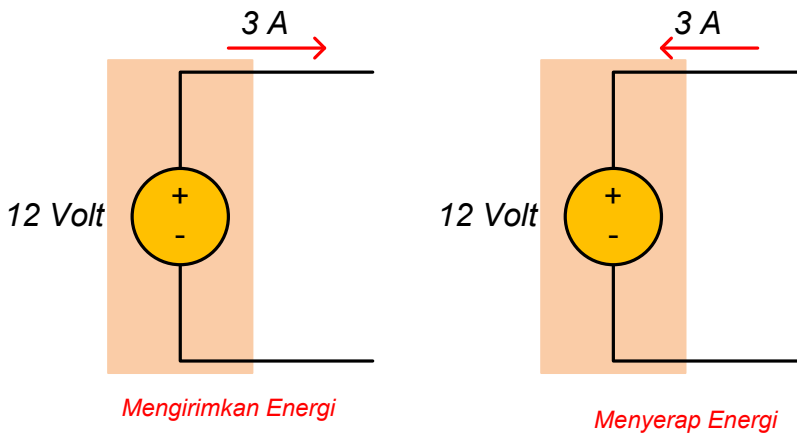
## Sumber Arus Bebas (Independent Current Source)

Merupakan elemen berkutub dua yang mampu mengalirkan arus dan menjaga pada nilai konstan tidak terpengaruh pada besarnya tegangan pada kedua terminalnya.

Suatu sumber bebas umumnya selalu mengirimkan daya tetapi dalam kondisi tertentu, sumber ini dapat juga menyerap daya. Gambar-1.2 (kiri) : sumber mengirimkan daya sebesar  $P = V.I = 12 \text{ V} \cdot 3 \text{ A} = 36 \text{ Watt}$ . Gambar-1.3 (kanan) : sumber menyerap daya sebesar  $P = V.I = 12 \text{ V} \cdot 3 \text{ A} = 36 \text{ Watt}$



Gambar-1.2 Simbol sumber arus beban (independent current source)

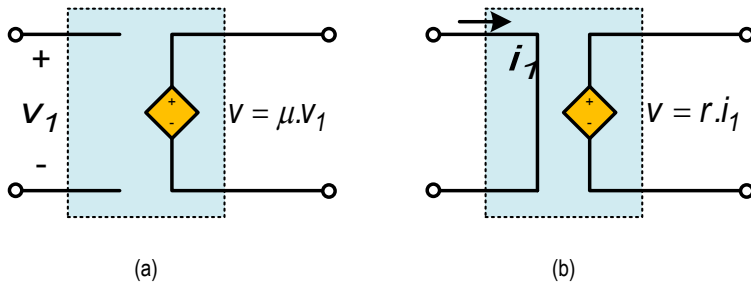


Gambar-1.3 Pengiriman dan penyerapan energi pada sumber tegangan beban (independent voltage source)



## Sumber Tegangan Tak Bebas (Dependent Voltage Source)

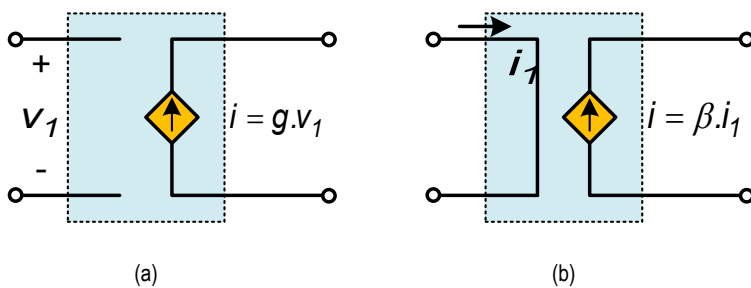
Suatu sumber tegangan tak bebas merupakan sumber tegangan yang terpengaruh atau bergantung pada arus/tegangan. Jika sumber tegangan tersebut bergantung pada tegangan maka dinamakan *Voltage Controlled Voltage Source* (VCVS) tetapi jika sumber tegangan tersebut bergantung pada arus maka dinamakan *Current Controlled Voltage Source* (CCVS)



Gambar-1.4 (a) Voltage Controlled Voltage Source (VCVS) dan (b) Current Controlled Voltage Source (CCVS)

## Sumber Arus Tak Bebas (Dependent Current Source)

Suatu sumber arus tak bebas merupakan sumber tegangan yang terpengaruh atau bergantung pada arus/tegangan. Jika sumber arus tersebut bergantung pada tegangan maka dinamakan *Voltage Controlled Current Source* (VCCS) tetapi jika sumber arus tersebut bergantung pada arus maka dinamakan *Current Controlled Current Source* (CCCS)



Gambar-1.5 (a) Voltage Controlled Current Source (VCCS) dan (b) Current Controlled Current Source (CCCS)

Dalam pemahaman analisis rangkaian listrik selalu terkait dengan besaran-besaran listrik. Untuk memberikan dasar yang perlu diingat maka berikut disajikan tabel besaran.



Tabel-1.1 Besaran-besaran listrik

NAMA BESARAN	SIMBOL	SATUAN
Muatan	Q	Coulomb (C)
Arus	I	Ampere (A)
Tegangan	V	Volt (V)
Daya	P	Watt (W)
Energi	W	Joule (J)

Hubungan antar besaran dapat disajikan secara sederhana sebagai berikut:

$$V = IR \quad (1-1a)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (1-1b)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (1-1c)$$

$$P = VI \quad (1-2a)$$

$$P = I^2 R \quad (1-2b)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1-2c)$$

$$W = Pt \quad (1-3a)$$

$$W = VIt \quad (1-3b)$$

$$W = I^2 Rt \quad (1-3c)$$

$$W = \frac{V^2}{R} t \quad (1-3d)$$

### 1.3 HUKUM OHM

Di dalam disiplin teknik elektro dikenal Hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus listrik yang melalui suatu konduktor di antara dua titik akan berbanding lurus dengan beda potensial (tegangan) dan berbanding terbalik dengan resistansi (tahanan). Secara matematis dinyatakan dengan persamaan

$$I = \frac{V}{R} \quad (1-4)$$

di mana :



I = arus listrik (Ampere)

V = tegangan (Volt)

R = tahanan (Ohm)

Pernyataan di atas mengandung arti bahwa jika terdapat suatu rangkaian tertutup dengan sumber tegangan yang dihubungkan ke beban listrik (resistor) maka akan mengalir arus listrik, besarnya arus tersebut akan mengikuti Hukum Ohm. Memperhatikan hukum tersebut juga dapat dinyatakan bahwa tegangan yang terukur pada kedua ujung beban resistor besarnya dapat ditentukan dengan mengalikan nilai resistansi dan nilai arus yang melaluinya. Pada Gambar-1.6 disajikan suatu rangkaian yang terdiri dari sumber tegangan DC sebesar 24 Volt, saklar dan beban resistor sebesar 6 Ohm. Saat saklar masih dalam kondisi terbuka maka tidak akan ada arus yang mengalir dan tegangan pada resistor sama dengan nol. Selanjutnya jika saklar ditutup maka arus akan mengalir menuju beban dan kembali ke sumber. Pada sisi sumber arus listrik akan keluar dari terminal positif dan kembali menuju terminal negatif. Besarnya arus yang mengalir ditentukan dengan

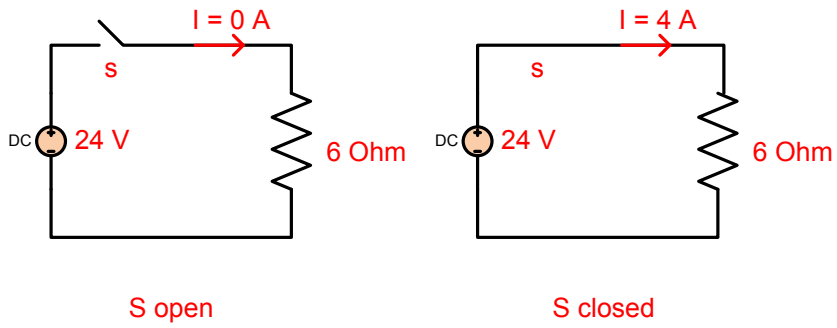
$$I = \frac{24}{6} = 4 \text{ Ampere}$$

Sedangkan tegangan yang terukur pada resistor adalah sebesar

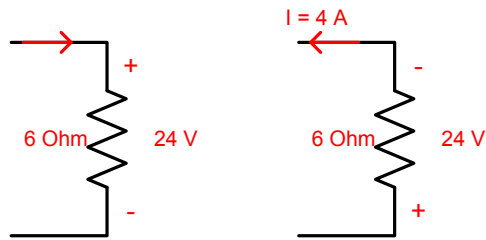
$$V = I.R = 4 \times 6 = 24 \text{ Volt}$$

Jika ditinjau bagaimana menentukan polaritas tegangan yang terjadi pada beban maka dapat diperhatikan pada Gambar-1.7. Untuk beban resistif, maka polaritas tegangan ditentukan oleh arah arus listrik. Polaritas positif (+) ditandai dengan terminal di mana arus listrik masuk sedangkan terminal negatif (-) ditandai dengan terminal yang ditinggalkan arus. Pada Gambar-1.8 disajikan suatu gelombang tegangan DC konstan yang digunakan pada suatu sistem dengan beban resistif. Arus yang mengalir juga akan memiliki bentuk yang sama dengan gelombang tegangan yang digunakan. Sedangkan Gambar-1.9 menunjukkan gelombang tegangan AC yang dikenakan pada sistem dengan beban resistif.

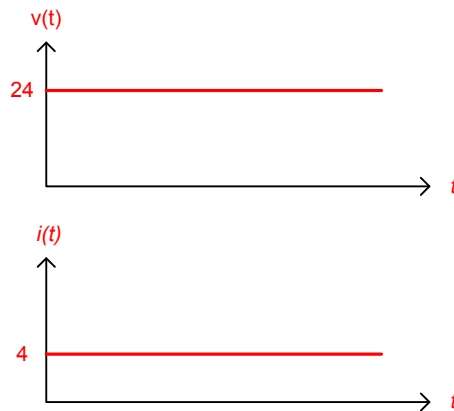




**Gambar-1.6** Rangkaian tertutup dengan sumber tegangan DC dan beban resistor

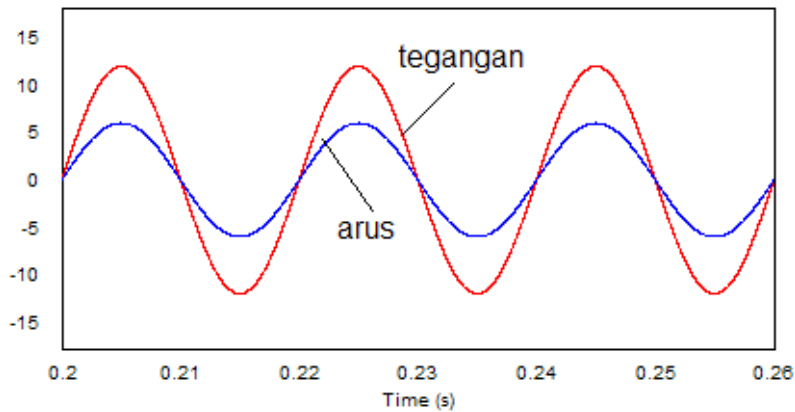


**Gambar-1.7** Polaritas tegangan pada resistor



**Gambar-1.8** Gelombang tegangan dan arus saat diberikan arus DC





Gambar-1.9 Gelombang tegangan dan arus saat diberikan arus AC

#### 1.4 HUKUM KIRCHHOFF

Pada hukum Ohm diterangkan hubungan antara besaran tegangan, arus dan resistansi. Untuk lebih memahami tentang bagaimana sifat tegangan dan arus dalam rangkaian, Kirchhoff mengemukakan kedua besaran dalam konsepnya. Dalam hukum Kirchhoff untuk arus (*Kirchhoff's Current Law = KCL*), dinyatakan bahwa pada satu titik percabangan (*node*) maka jumlah seluruh arus yang masuk ke titik percabangan sama dengan jumlah arus yang meninggalkan titik percabangan. Secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\sum i_N = \sum i_{OUT} \quad (1-5)$$

Dengan kata lain secara aljabar jumlah arus yang masuk/keluar di titik percabangan sama dengan nol, dinyatakan dengan

$$\sum i = 0 \quad (1-6)$$

Pada Gambar-1.10 ditunjukkan bagaimana sifat arus pada titik percabangan. Dengan menggunakan konsep jumlah arus yang masuk pada titik percabangan sama dengan jumlah arus yang meninggalkan percabangan maka dapat diturunkan

$$\sum i_N = \sum i_{OUT}$$

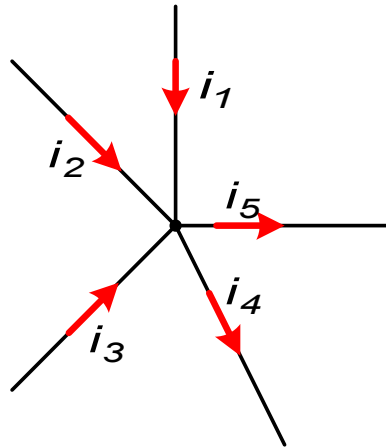
$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4 + i_5$$



Sedangkan dengan mengacu konsep jumlah aljabar arus yang masuk/keluar di titik percabangan sama dengan nol, maka dapat diturunkan persamaan

$$\sum i = 0$$

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

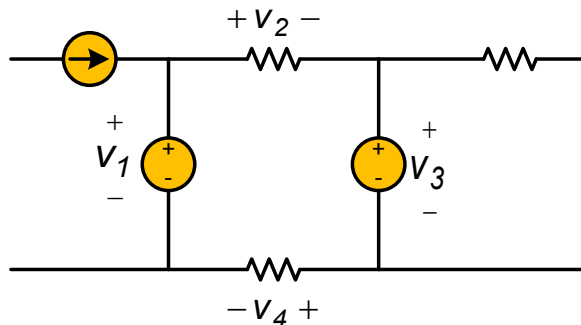


Gambar-1.10 Hubungan arus pada titik percabangan

Hukum Kirchoff lain yang sangat penting dalam memahami rangkaian listrik adalah hukum tentang tegangan (*Kirchoff's Voltage Law = KVL*). Dalam hukum tersebut dinyatakan bahwa jumlah aljabar dari tegangan-tegangan dalam lintasan (*loop*) tertutup selalu sama dengan nol. Untuk memahami hukum KVL maka pada Gambar-1.11 disajikan suatu rangkaian sederhana dengan tiga resistansi, dua sumber tegangan dan sebuah sumber arus. Dengan mengacu pada KVL maka akan didapat persamaan

$$\sum v = 0$$

$$v_1 - v_2 - v_3 - v_4 = 0 \quad (1-7)$$



Gambar-1.11 Hubungan tegangan pada lintasan tertutup



## 1.5 RESISTANSI SERI DAN PEMBAGI TEGANGAN

Dengan memperhatikan Gambar-1.12 dan menggunakan hukum Kirchhoff tentang tegangan (KVL) maka dapat diturunkan persamaan

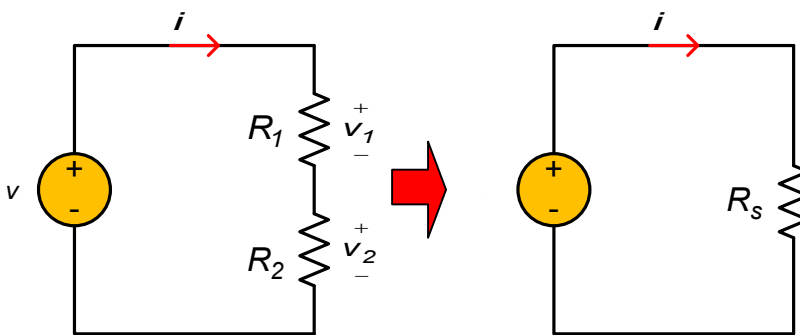
$$V = V_1 + V_2$$

jika  $v_1 = R_1 \cdot i$  dan  $v_2 = R_2 \cdot i$

maka  $v = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i = (R_1 + R_2) \cdot i$

sehingga  $i = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{V}{R_s}$  (1-8)

di mana  $R_s = R_1 + R_2$



Gambar-1.12 Dua buah resistansi yang dihubungkan secara seri

Dengan demikian maka jika suatu rangkaian memiliki N buah resistor yang dihubungkan secara seri maka diperoleh persamaan resistansi ekuivalen seri sebesar

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n \quad (1-9)$$

Tegangan pada masing-masing resistor akan memiliki nilai sebanding dengan resistansinya, sehingga

$$v_1 = \frac{R_1}{R_s} V \quad v_2 = \frac{R_2}{R_s} V \quad v_3 = \frac{R_3}{R_s} V \quad \text{dan} \quad v_N = \frac{R_N}{R_s} V \quad (1-10)$$





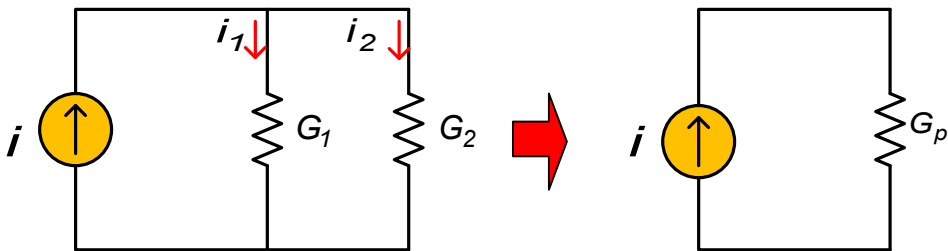
## 1.6 RESISTANSI PARALEL DAN PEMBAGI ARUS

Mengacu pada Gambar-1.13 dan menggunakan hukum Kirchhoff tentang arus (KCL) maka dapat diturunkan persamaan

$$i = i_1 + i_2 \quad (1-11)$$

Dengan menggunakan besaran konduktansi yang merupakan kebalikan resistansi  $G = \frac{1}{R}$  di mana konduktansi memiliki satuan Siemens (S)

$$\text{Jika } i_1 = G_1 \cdot v \text{ dan } i_2 = G_2 \cdot v \quad (1-12)$$



Gambar-1.13 Dua buah resistansi yang dihubungkan secara paralel

$$\text{Maka } i = G_1 \cdot v + G_2 \cdot v = (G_1 + G_2) \cdot v$$

$$v = \frac{i}{G_1 + G_2} = \frac{i}{G_p} \quad (1-13)$$

$$\text{di mana } G_p = G_1 + G_2$$

Dengan mengembalikan ke dalam bentuk resistansi maka

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-14)$$

Sehingga jika suatu rangkaian memiliki N buah resistor yang dihubungkan secara paralel maka diperoleh persamaan resistansi ekuivalen seri sebesar

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n} \quad (1-15)$$

Arus yang mengalir pada masing-masing resistor akan memiliki nilai berbanding terbalik dengan resistansinya, sehingga

$$i_1 = \frac{G_1}{G_p} i \quad i_2 = \frac{G_2}{G_p} i \quad i_3 = \frac{G_3}{G_p} i \quad \text{dan} \quad i_N = \frac{G_N}{G_p} i$$

atau



$$i_1 = \frac{R_p}{R_1} i \quad i_2 = \frac{R_p}{R_2} i \quad i_3 = \frac{R_p}{R_3} i \quad i_N = \frac{R_p}{R_N} i$$

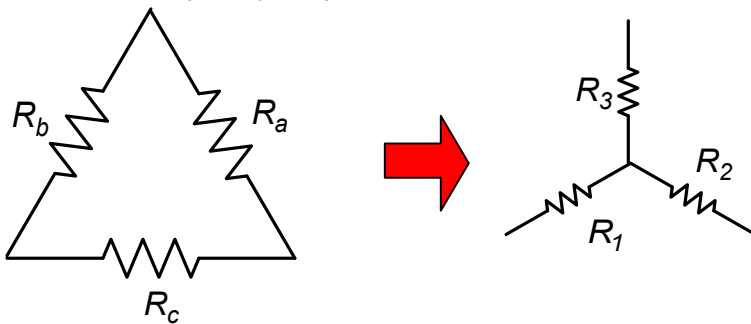
## 1.7 TRANSFORMASI DELTA-WYE DAN SEBALIKNYA

Dalam rangkaian listrik adakalanya dijumpai hubungan tahanan yang memerlukan suatu transformasi delta-ye atau sebaliknya untuk menyederhanakan. Pada Gambar-1.14 ditunjukkan rangkaian dalam bentuk delta akan diubah menjadi rangkaian dalam bentuk wye. Hubungan yang menunjukkan transformasi delta-ye adalah sebagai berikut

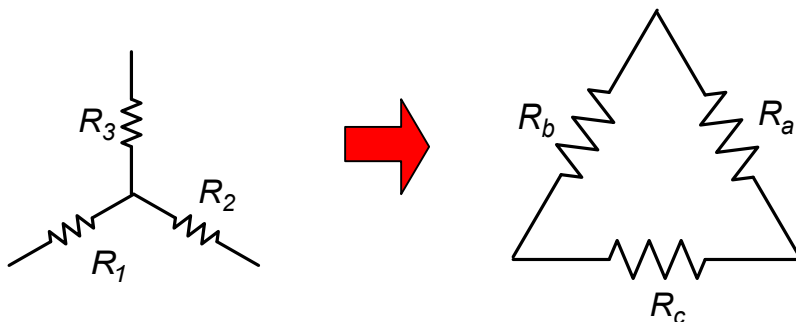
$$R_1 = \frac{R_b \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (1-16a)$$

$$R_2 = \frac{R_a \cdot R_c}{R_a + R_b + R_c} \quad (1-16b)$$

$$R_3 = \frac{R_a \cdot R_b}{R_a + R_b + R_c} \quad (1-16c)$$



Gambar-1.14 Transformasi dari rangkaian delta ke rangkaian wye



Gambar-1.15 Transformasi dari rangkaian wye ke rangkaian delta

Sedangkan pada Gambar-1.15 ditunjukkan rangkaian dalam bentuk wye akan diubah menjadi rangkaian dalam bentuk delta. Hubungan yang menunjukkan transformasi wye-delta adalah sebagai berikut

$$R_a = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1}{R_1} \quad (1-17a)$$

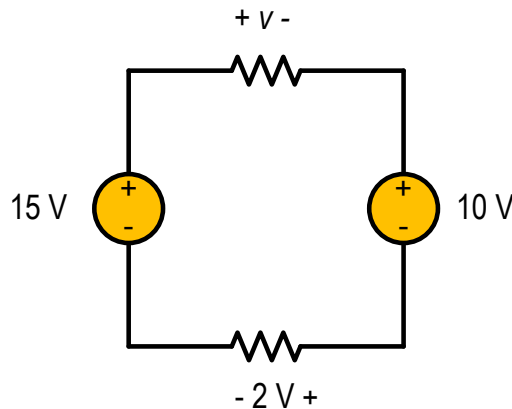
$$R_a = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1}{R_2} \quad (1-17b)$$

$$R_a = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1}{R_3} \quad (1-17c)$$

## 1.8 LATIHAN

### Latihan-1.1

Tentukan nilai tegangan  $v$  dari rangkaian pada Gambar-1.16 berikut



Gambar-1.16 Rangkaian untuk Latihan-1.1

### Jawab-1.1

Dengan mengacu pada KVL maka diperoleh konsep jumlah tegangan-tegangan dalam satu lintasan tertutup sama dengan nol

$$\begin{aligned} \sum v &= 0 \\ 15 - v - 10 - 2 &= 0 \\ v &= 15 - 10 - 2 = 3 \text{ Volt} \end{aligned}$$

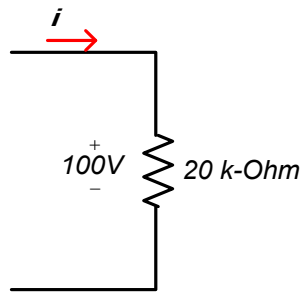


### Latihan-1.2

Suatu resistor sebesar 20 k-Ohm memiliki tegangan pada kedua ujung terminalnya sebesar 100 Volt. Tentukan (a) nilai konduktansinya, (b) arus yang mengalir masuk ke terminalnya (c) daya minimum dari resistor

### Jawab-1.2

Diketahui  $R = 20 \text{ k}\Omega$   
 $V_R = 100 \text{ V}$



Gambar-1.17 Rangkaian untuk Latihan-1.2

Konduktansi  $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{20.000} = \frac{1.000.000}{20.000} \mu\text{S} = 50 \mu\text{S}$

Arus yang mengalir  $i = G \cdot V = (0,00005)(100) = 5 \text{ mA}$

Daya minimum resistor  $P_R = V_R \cdot i_R = (100)(0,005) = 0,5 \text{ W}$

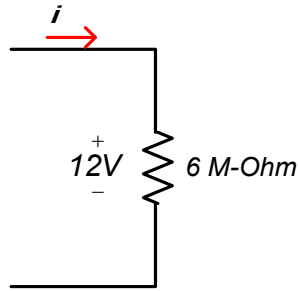
### Latihan-1.3

Resistor sebesar 6 M-Ohm memiliki tegangan pada kedua ujung terminalnya sebesar 12 Volt. Tentukan (a) arus yang mengalir masuk ke terminalnya (c) daya yang diserap resistor

### Jawab-1.3

Diketahui  $R = 6 \text{ M}\Omega$   
 $V_R = 12 \text{ V}$





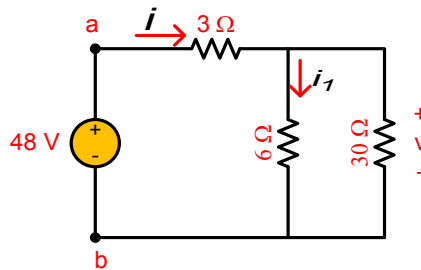
Gambar-1.18 Rangkaian untuk Latihan-1.3

Arus yang mengalir 
$$i = \frac{V_R}{R} = \frac{12}{6.000.000} = 2 \mu\text{A}$$

Daya pada resistor 
$$P_R = V_R \cdot i_R = (12)(0,000002) = 24 \mu\text{W}$$

#### Latihan-1.4

Tentukan nilai resistansi ekuivalen dari rangkaian gambar di bawah ini, kemudian hitunglah nilai arus  $i$ ,  $i_1$  dan tegangan  $v$



Gambar-1.19 Rangkaian untuk Latihan-1.4

#### Jawab-1.4

Untuk menyederhanakan perhitungan maka terminal a-b dipisahkan resistansinya, dengan demikian diperoleh rangkaian resistor di bawah

Resistor  $3\Omega$  dan  $6\Omega$  terhubung paralel, penyederhanaan akan menghasilkan

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} + \frac{1}{6} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$$

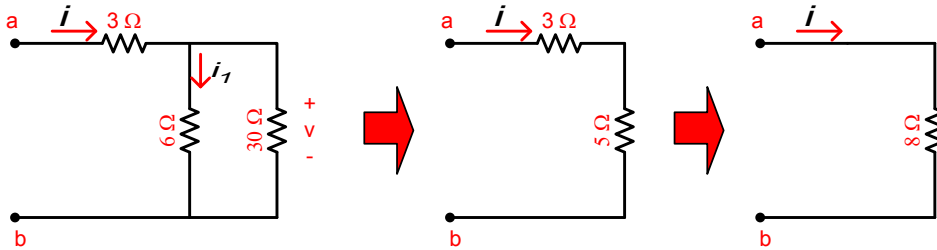
$$R_x = 1,5 \Omega$$



Selanjutnya resistor  $5\Omega$  dan  $3\Omega$  terhubung seri akan menghasilkan

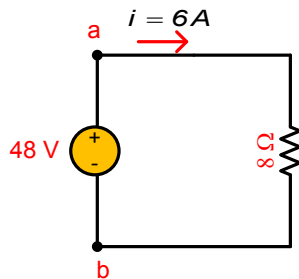
$$R_{ab} = 5 + 3 = 8\Omega$$

Jadi resistansi ekuivalen sama dengan  $8\Omega$



Nilai arus  $i$  dapat ditentukan dengan gambar di bawah

$$i = \frac{48}{8} = 6A$$



Selanjutnya nilai arus  $i$  dapat ditentukan dengan konsep pembagi arus

$$i_1 = \frac{30}{30 + 6} (i) = \frac{30}{36} (6) = \frac{5}{6} (6) = 5A$$

Tegangan  $v$  dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Ohm, yaitu arus yang melewati resistor  $30\Omega$  dikalikan dengan resistansinya. Arus yang melewati resistansi  $30\Omega$  adalah sebesar

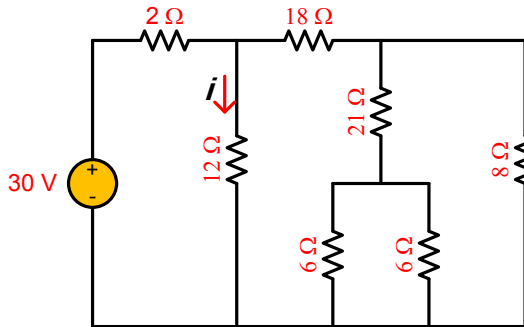
$$i_{30\Omega} = i - i_1 = 6 - 5 = 1A$$

$$v = i.R = (1)(30) = 30V$$



### Latihan-1.5

Tentukan nilai resistansi ekuivalen dari rangkaian gambar di bawah ini, kemudian hitunglah nilai arus  $i$



Gambar-1.20 Rangkaian untuk Latihan-1.5

### Jawab-1.5

Resistansi  $24\ \Omega$  yang terhubung paralel dengan  $8\ \Omega$  dapat disederhanakan menjadi

$$R_{24 // 8} \Rightarrow \frac{1}{R_{24 // 8}} = \frac{1}{24} + \frac{1}{8} = \frac{1}{24} + \frac{3}{24} = \frac{4}{24} = \frac{1}{6}$$

$$R_{24 // 8} = 6\ \Omega$$

Resistansi  $18\ \Omega$  yang terhubung seri dengan  $6\ \Omega$  dapat disederhanakan menjadi

$$R_{18-6} = 18 + 6 = 24\ \Omega$$

Resistansi  $24\ \Omega$  yang terhubung paralel dengan  $12\ \Omega$  dapat disederhanakan menjadi

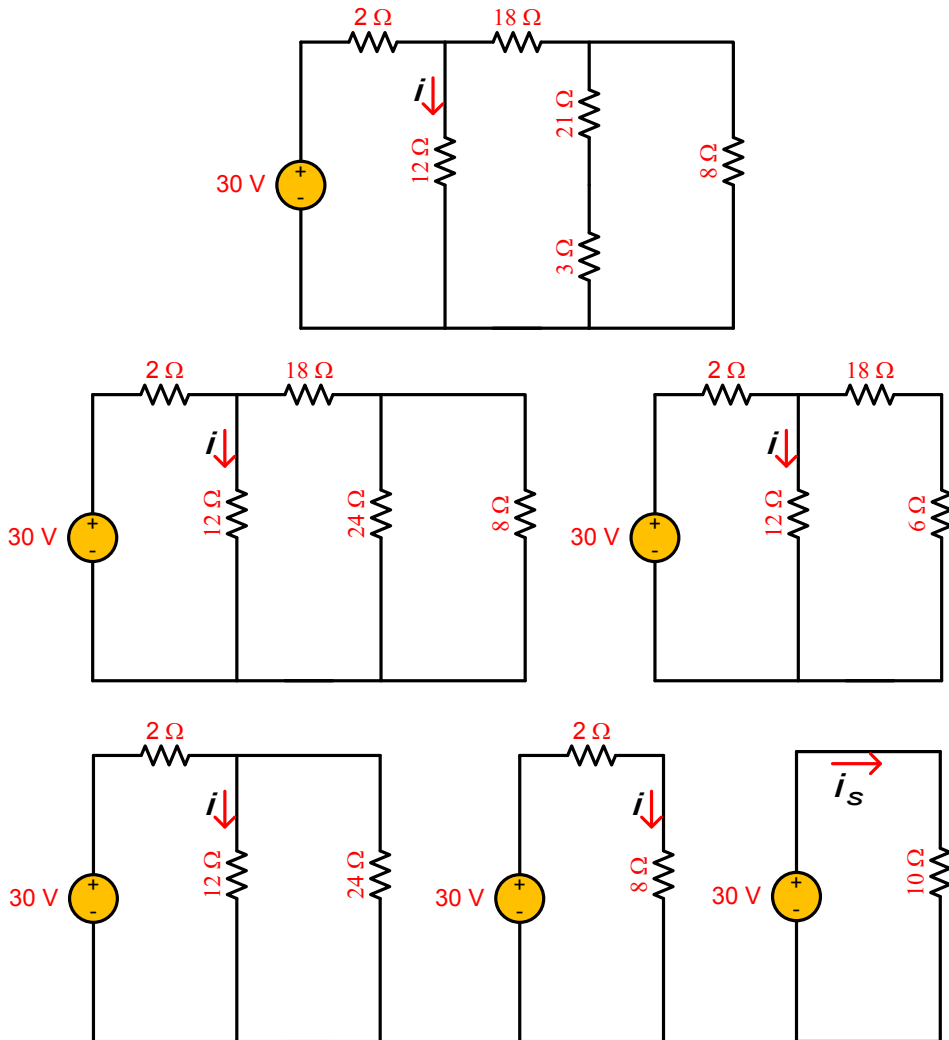
$$R_{24 // 12} \Rightarrow \frac{1}{R_{24 // 12}} = \frac{1}{24} + \frac{1}{12} = \frac{1}{24} + \frac{2}{24} = \frac{3}{24} = \frac{1}{8}$$

$$R_{24 // 12} = 8\ \Omega$$

Resistansi  $8\ \Omega$  yang terhubung seri dengan  $2\ \Omega$  dapat disederhanakan menjadi

$$R_{8-2} = 8 + 2 = 10\ \Omega$$





Arus utama yang keluar dari sumber tegangan adalah sebesar

$$i_s = \frac{30}{10} = 3A$$

Arus yang mengalir pada resistansi  $12\Omega$  dapat ditentukan dengan menggunakan konsep pembagi arus

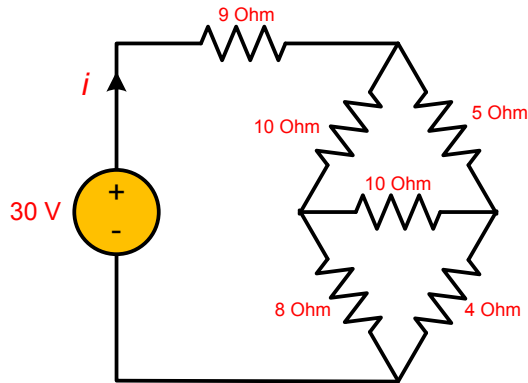
$$i_1 = \frac{24}{12 + 24} (3) = \frac{2}{3} (3) = 2A$$





### Latihan-1.6

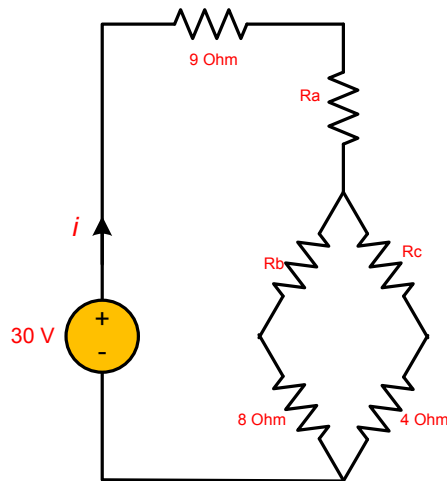
Tentukan nilai arus  $i$  dari rangkaian pada Gambar-1.21



Gambar-1.21 Rangkaian untuk Latihan-1.6

### Jawab-1.6

Untuk menyelesaikan soal di atas maka perlu digunakan transformasi delta-wye sehingga rangkaian menjadi seperti di bawah ini

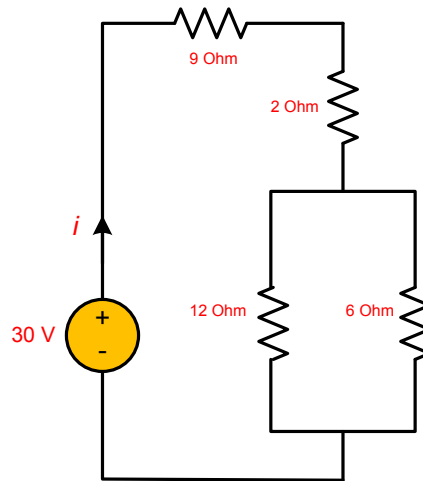


Dengan nilai resistansi hasil transformasi adalah sebagai berikut

$$R_a = \frac{10 \cdot 5}{10 + 10 + 5} = \frac{50}{25} = 2 \text{ Ohm}$$

$$R_b = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10 + 5} = \frac{100}{25} = 4 \text{ Ohm}$$

$$R_c = \frac{10 \cdot 5}{10 + 10 + 5} = \frac{50}{25} = 2 \text{ Ohm}$$



Resistor  $R_c$  terhubung seri dengan resistor 4 Ohm menjadi  $\rightarrow$   
 $R_c + 4 = 2 + 4 = 6 \text{ Ohm}$

Resistor  $R_b$  terhubung seri dengan resistor 8 Ohm menjadi  $\rightarrow$

Selanjutnya kedua resistor di atas terhubung paralel dengan nilai

$$R_p = 6 // 12 = \frac{6 \cdot 12}{6 + 12} = \frac{72}{18} = 4 \text{ Ohm}$$

Sehingga nilai resistansi keseluruhan

$$R_T = 9 + R_a + 4 = 9 + 2 + 4 = 15 \text{ Ohm}$$

Maka arus yang keluar dari sumber tegangan adalah

$$i = \frac{30}{15} = 2 \text{ Ampere}$$

## Daftar Pustaka

1. Johnson, D. E, Johnson, J. R, Hilburn, J. L.. (1992) : *Electric Circuit Analysis*, Prentice-Hall International Edition
2. Kariis, S. T. (-) : *Circuit Analysis I*, Orchard Publication, California
3. Lucas, J. R. (-) : *Network Theorems*
4. Sudirham, S. (-) : *Analisis Rangkaian Listrik*



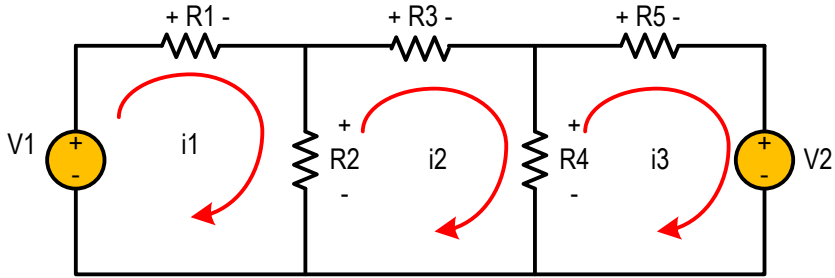
# Mesh Current dan Node Voltage

## 2.1 PENDAHULUAN

Penyelesaian suatu persoalan terkait masalah rangkaian listrik dengan sumber tegangan DC memerlukan bantuan beberapa teorema. Dengan menerapkan hukum Kirchhoff untuk tegangan atau arus beberapa permasalahan dapat diselesaikan walaupun masih terdapat keterbatasan. Metoda *Node Voltage* sebagai salah satu metoda yang mengacu pada hukum Kirchhoff tentang arus dan metoda *Mesh Current* yang mengacu pada Kirchhoff tentang tegangan merupakan metoda yang cukup sederhana dalam melakukan analisis rangkaian listrik.

## 2.2 METODA MESH CURRENT

Metoda *Mesh Current* merupakan suatu metoda untuk melakukan analisis rangkaian dengan menerapkan hukum Kirchhoff tentang tegangan (KVL). Metoda ini dilakukan dengan menentukan lintasan tertutup dalam rangkaian. Sebagai contoh pada Gambar-2.1 ditunjukkan suatu rangkaian dengan tiga buah *loop*. Pada *loop-1* terdapat dua buah resistansi  $R_1$ ,  $R_2$  dan sumber tegangan  $v_1$  dengan arus yang mengalir adalah  $i_1$ . Pada *loop-2* terdapat tiga buah resistansi  $R_2$ ,  $R_3$  dan  $R_4$  dengan arus yang mengalir adalah  $i_2$ . Sedangkan pada *loop-3* terdapat dua buah resistansi  $R_4$ ,  $R_5$  dan sumber tegangan  $v_2$  dengan arus yang mengalir adalah  $i_3$ . Dengan memperhatikan gambar tersebut tampak bahwa arus yang mengalir pada  $R_1$  adalah sama dengan  $i_1$  sedangkan arus yang mengalir pada  $R_2$  adalah sama dengan  $(i_1 - i_2)$ .



Gambar-2.1 Rangkaian dengan tiga buah **loop** untuk analisis *mesh current*

Dengan menggunakan KVL maka persamaan pada tiap *loop* dapat ditentukan. Persamaan yang dapat diturunkan pada *loop*-1 adalah

$$\begin{aligned} V_1 - V_{R1} - V_{R2} &= 0 \\ V_1 - i_1 R_1 - (i_1 - i_2) R_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

Persamaan pada *loop*-2 didapatkan sebagai berikut

$$\begin{aligned} -V_{R2} + V_{R3} + V_{R4} &= 0 \\ (i_1 - i_2) R_2 + i_2 R_3 + (i_2 - i_3) R_4 &= 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

Sedangkan persamaan yang dapat diturunkan pada *loop*-3 adalah

$$\begin{aligned} V_2 - V_{R4} + V_{R5} &= 0 \\ V_2 + (i_2 - i_3) R_4 + i_3 R_5 &= 0 \end{aligned} \quad (2-3)$$

Untuk memberikan detail pemahaman tentang metoda *mesh current* maka pada Gambar-2.2 disajikan suatu rangkaian sederhana dengan dua buah *loop* dengan nilai resistansi dan tegangan sebagai berikut

$$R_1 = 4 \text{ Ohm}$$

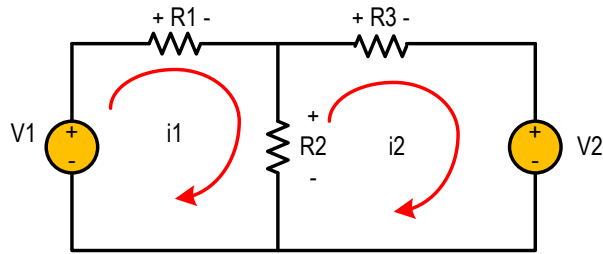
$$R_2 = 2 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 1 \text{ Ohm}$$

$$v_1 = 28 \text{ Volt}$$

$$v_2 = 7 \text{ Volt}$$





Gambar-2.2 Rangkaian dengan dua buah loop

Persamaan pada loop-1

$$\begin{aligned}
 V_1 - V_{R1} - V_{R2} &= 0 \\
 V_1 - i_1 R_1 - (i_1 - i_2) R_2 &= 0 \\
 28 - 4i_1 - 2(i_1 - i_2) &= 0 \\
 6i_1 - 2i_2 &= 28 \qquad (2-4)
 \end{aligned}$$

Persamaan pada loop-2

$$\begin{aligned}
 V_2 - V_{R2} + V_{R3} &= 0 \\
 V_2 - (i_1 - i_2) R_2 + i_2 R_3 &= 0 \\
 7 - 2(i_1 - i_2) + i_2 &= 0 \\
 2i_1 - 3i_2 &= 7 \qquad (2-5)
 \end{aligned}$$

Selanjutnya langkah yang dilakukan adalah melakukan proses eliminasi dari persamaan (2-4) dan (2-5).

$$\begin{aligned}
 6i_1 - 2i_2 = 28 &\Rightarrow \times 1 \Rightarrow 6i_1 - 2i_2 = 28 \\
 2i_1 - 3i_2 = 7 &\Rightarrow \times 3 \Rightarrow 6i_1 - 9i_2 = 21 \\
 6i_1 - 2i_2 &= 28 \\
 6i_1 - 9i_2 &= 21 \\
 \hline
 7i_2 &= 7 \\
 \Rightarrow i_2 &= 1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

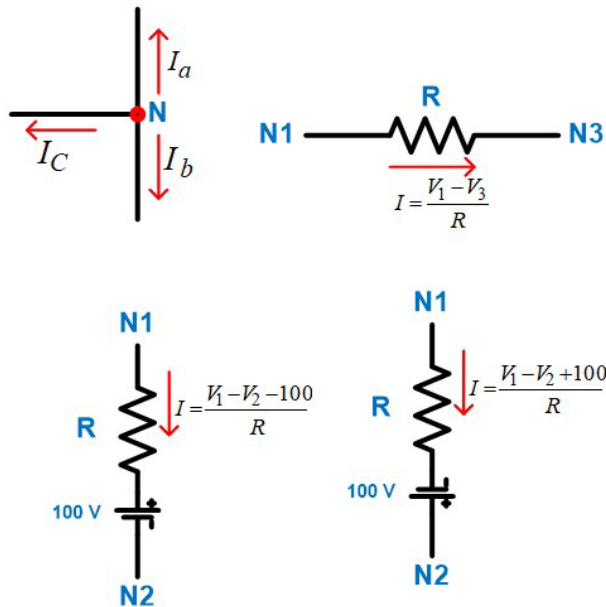
Setelah  $i_2$  diketahui maka  $i_1$  dicari dengan menggunakan

$$\begin{aligned}
 6i_1 - 2i_2 = 28 &\Rightarrow 6i_1 - 2(1) = 28 \\
 \Rightarrow 6i_1 - 2 &= 28 \\
 \Rightarrow 6i_1 &= 28 + 2 \\
 \Rightarrow i_1 &= 5 \text{ A}
 \end{aligned}$$



### 2.3 METODA NODE VOLTAGE

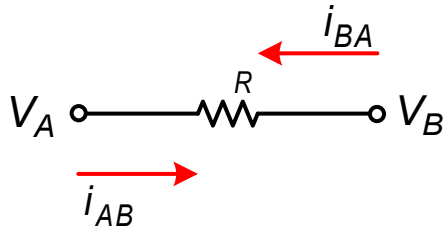
Metoda *Node Voltage* merupakan suatu cara untuk melakukan analisis rangkaian listrik dengan menggunakan hukum Kirchhoff tentang arus (KCL). Untuk memahami konsep metoda ini maka perlu diperhatikan Gambar-2.3 di bawah.



Gambar-2.3 Hubungan tegangan dan arus

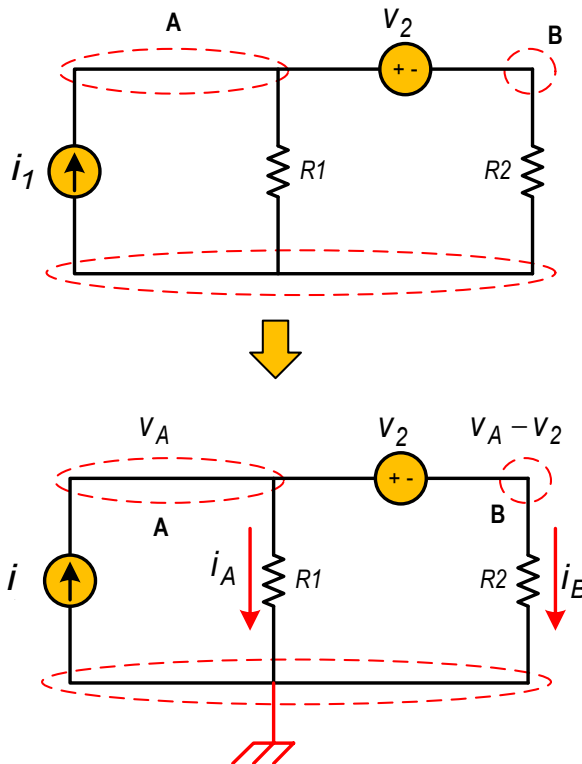
Pada Gambar-2.3b, jika terdapat suatu resistansi sebesar  $R$  dan tegangan pada kedua ujung resistansi sebesar  $V_1$  dan  $V_3$  maka besarnya arus yang mengalir pada resistansi tersebut sebesar  $i = \frac{V_1 - V_3}{R}$ . Sedangkan jika disisipkan tegangan sebesar 100 Volt (polaritas + dimasuki arus) secara seri dengan resistansi (Gambar-2.3c) maka besarnya arus yang mengalir pada resistansi  $i = \frac{V_1 - V_2 - 100}{R}$ . perubahan polaritas tegangan akan mempengaruhi arus, jika polaritas tegangan 100 Volt dibalik (arus masuk polaritas - dari tegangan) maka arus yang mengalir pada resistansi menjadi  $i = \frac{V_1 - V_2 + 100}{R}$ . Pada Gambar-2.4 disajikan suatu resistansi dengan tegangan pada kedua ujungnya sebesar  $V_A$  dan  $V_B$ . Jika arus mengalir dari tegangan  $V_A$  menuju ke  $V_B$  maka besarnya arus yang mengalir sebesar  $i_{AB} = \frac{V_A - V_B}{R}$  sedangkan jika arus mengalir dari  $V_B$  menuju ke  $V_A$  maka besarnya arus yang mengalir sebesar  $i_{BA} = \frac{V_B - V_A}{R}$ .





Gambar-2.4 Pengaruh perubahan arah arus terhadap persamaan

Penjabaran selanjutnya dilakukan dengan mengacu Gambar-2.5 di mana pada gambar tersebut terdapat sumber arus dan sumber tegangan. Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan titik-titik sebagai *node*, selanjutnya menentukan tegangan tiap *node* tersebut. *Node* yang paling bawah dianggap sebagai *node* acuan (*ground*) dengan nilai tegangan sebesar nol. Selanjutnya pada *node*-A dimisalkan memiliki nilai tegangan sebesar  $V_A$  dan pada *node*-B memiliki tegangan sebesar  $V_A - V_2$ .



Gambar-2.5 Rangkaian dengan sumber arus dan sumber tegangan untuk analisis **Node Voltage**

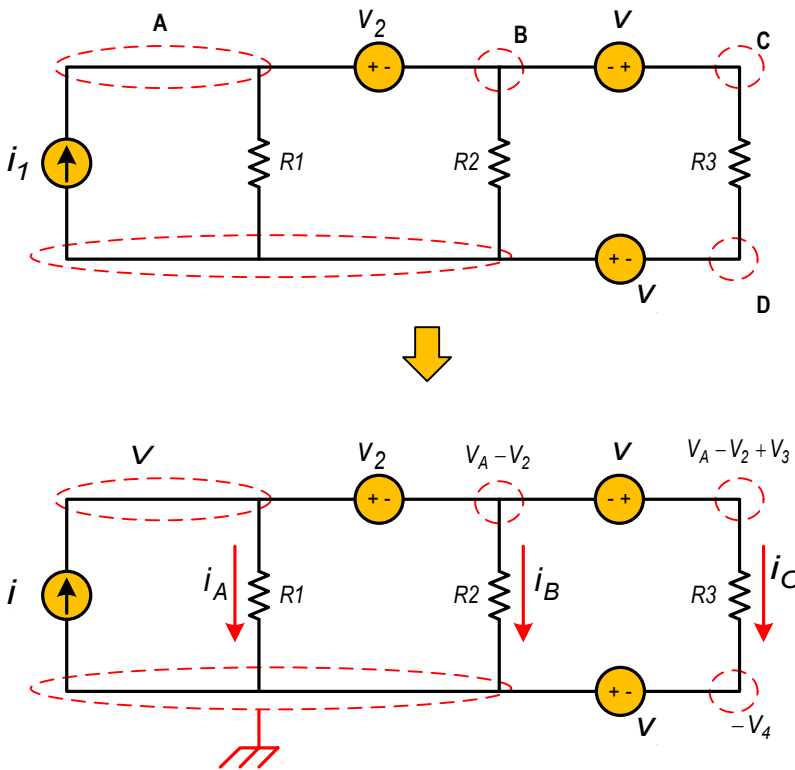
Dengan menggunakan KCL maka dapat ditentukan bahwa jumlah arus keluar dari satu titik percabangan sama dengan jumlah arus yang masuk, sehingga



$$i_1 = i_A + i_B$$

$$i_1 = \frac{V_A}{R_1} + \frac{V_A - V_2}{R_2}$$

Pada Gambar-2.6 disajikan suatu rangkaian dengan sebuah sumber arus dan tiga buah sumber tegangan untuk pemahaman lanjut dari analisis menggunakan *Node Voltage*. Dengan mengacu tegangan acuan maka titik A akan memiliki tegangan sebesar  $V_A$ , titik B memiliki tegangan sebesar  $V_A - V_2$  dan titik C memiliki tegangan sebesar  $V_A - V_2 + V_3$ . Sedangkan titik D ditentukan dengan seolah menghubungkan polaritas (+) tegangan  $V_4$  dengan *ground* dan terminal (-) ke titik D sehingga tegangan di titik D sebesar  $-V_4$ .



Gambar-2.6 Rangkaian dengan satu sumber arus dan tiga buah sumber tegangan untuk analisis **Node Voltage**

Dengan menggunakan KCL maka dapat ditentukan bahwa jumlah arus keluar dari satu titik percabangan sama dengan jumlah arus yang masuk, sehingga

$$i_1 = i_A + i_B + i_C$$

$$i_1 = \frac{V_A}{R_1} + \frac{V_A - V_2}{R_2} + \frac{V_A - V_2 + V_3 - (-V_4)}{R_3}$$

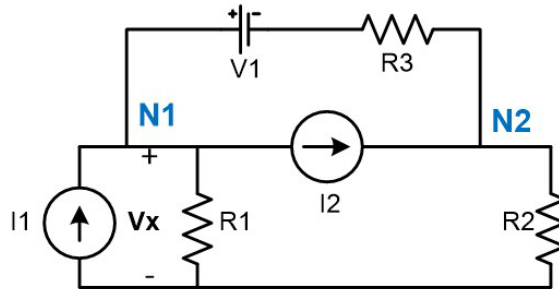




## 2.4 LATIHAN

### Latihan-2.1

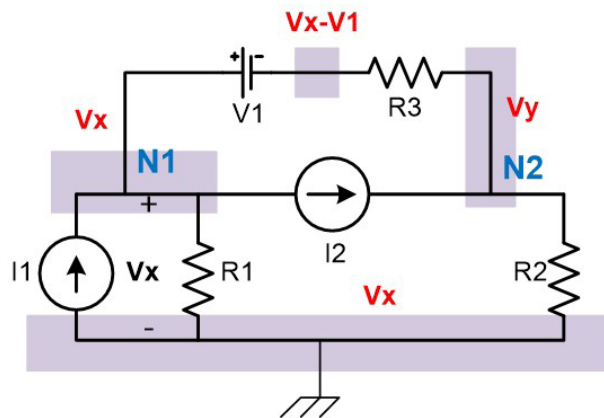
Pada Gambar-2.7 ditunjukkan suatu rangkaian, tentukan persamaan arus pada titik n1 dan titik n2.



Gambar-2.7 Rangkaian untuk Latihan-2.1

### Jawab-2.1

Langkah yang dilakukan untuk menyelesaikan adalah dengan cara menentukan titik-titik sebagai *node* dan tegangan pada kedua ujung tiap resistansi.



Gambar-2.8 *Node* dan tegangan tiap ujung resistansi pada rangkaian untuk Latihan-2.1

Dengan menggunakan KCL dan mengacu pada Gambar-2.8 maka persamaan arus pada *node*-n1 adalah

$$i_1 = \frac{V_x}{R_1} + i_2 + \frac{V_x - V_1 - V_y}{R_3}$$

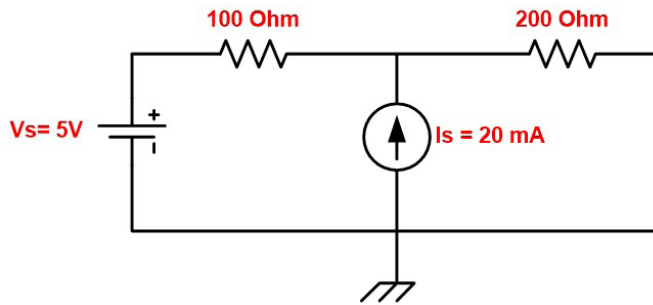
dan persamaan arus pada *node*-n2 adalah



$$i_2 = \frac{v_y}{R_2} + \frac{v_y - (v_x - v_1)}{R_3}$$

### Latihan-2.2

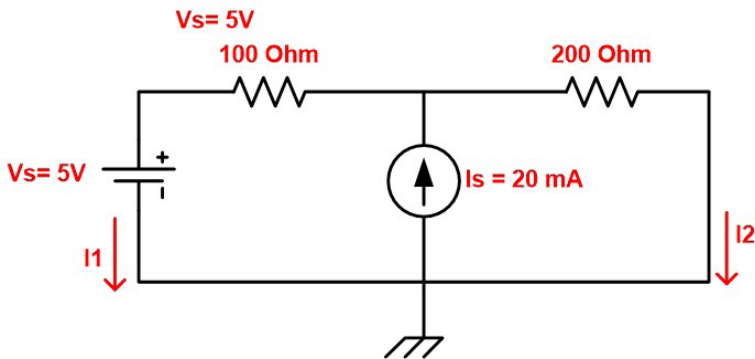
Tentukan nilai tegangan  $v_1$  dari rangkaian pada Gambar-2.9.



Gambar-2.9 Rangkaian untuk Latihan-2.2

### Jawab-2.2

Dengan melengkapi arah arus maka dapat ditentukan persamaan arus pada *node* acuan, yaitu sebagai berikut



$$i_s = i_1 + i_2$$

$$0,02 = \frac{V_1 - 5}{100} + \frac{V_1}{200}$$

Kedua ruas dikalikan (200)



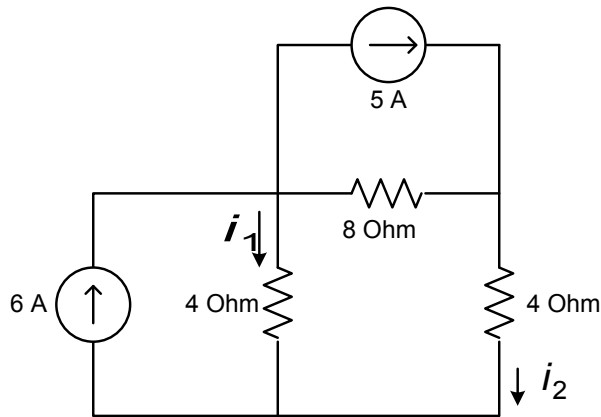
$$4 = 2V_1 - 10 + V_1$$

$$4 = 3V_1 - 10$$

$$V_1 = \frac{14}{3} = 4,6667 \text{ Volt}$$

### Latihan-2.3

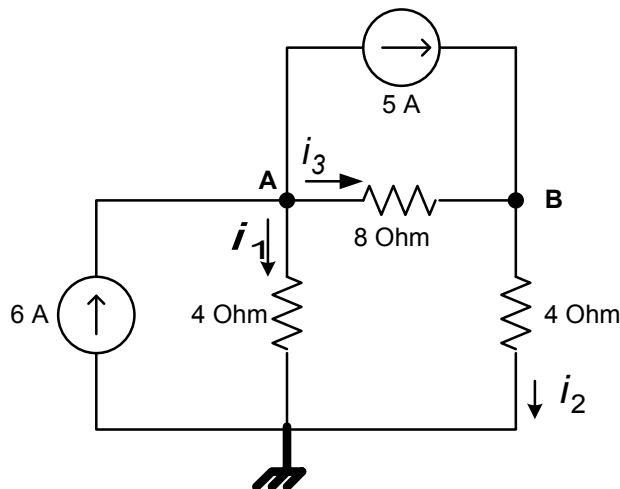
Tentukan nilai arus  $i_1$  dan  $i_2$  dari rangkaian pada Gambar-2.10 dengan menggunakan metoda *Node Voltage*



Gambar-2.10 Rangkaian untuk Latihan-2.3

### Jawab-3

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan titik percabangan dan *node* acuan seperti gambar di bawah.



Dengan mengasumsikan tegangan pada titik A sebesar  $v_A$  dan tegangan pada titik B sebesar  $v_B$  maka persamaan arus yang dapat ditentukan pada *node* acuan adalah sebagai berikut

$$i_1 + i_2 = 6$$

$$\frac{v_A}{4} + \frac{v_B}{4} = 6 \Rightarrow v_A + v_B = 24$$

Sedangkan persamaan arus pada *node*-A adalah

$$i_1 + i_3 = 6$$

$$\frac{v_A}{4} + \frac{v_A - v_B}{8} = 6 \Rightarrow 2v_A + v_A - v_B = 48$$

$$3v_A - v_B = 48$$

Dengan menggunakan kedua persamaan arus maka didapat

$$v_A + v_B = 24$$

$$\frac{3v_A - v_B = 48}{4v_A = 72} +$$

$$\Rightarrow v_A = 18 \text{ Volt}$$

$$\Rightarrow v_B = 6 \text{ Volt}$$

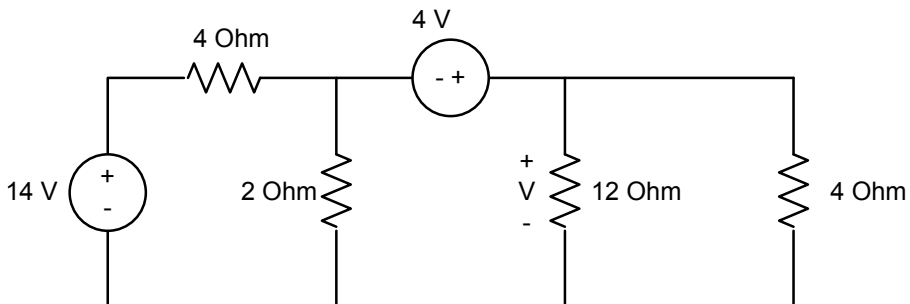
Maka

$$i_1 = \frac{v_A}{4} = \frac{18}{4} = 4,5 \text{ Ampere}$$

$$i_2 = \frac{v_B}{4} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ Ampere}$$

## Latihan-2.4

Tentukan nilai tegangan  $v$  dari rangkaian pada Gambar-2.11 dengan menggunakan metoda Mesh Current



Gambar-2.11 Rangkaian untuk Latihan-2.4



#### Jawab-4

Langkah awal yang dilakukan adalah melengkapi rangkaian dengan aliran arus di dalam *loop* masing-masing. Persamaan tegangan pada *loop*-1 diperoleh sebagai berikut

$$14 = 4.i_1 + 2.(i_1 - i_2)$$

$$14 = 6.i_1 - 2.i_2$$

Persamaan tegangan pada *loop*-2 diperoleh

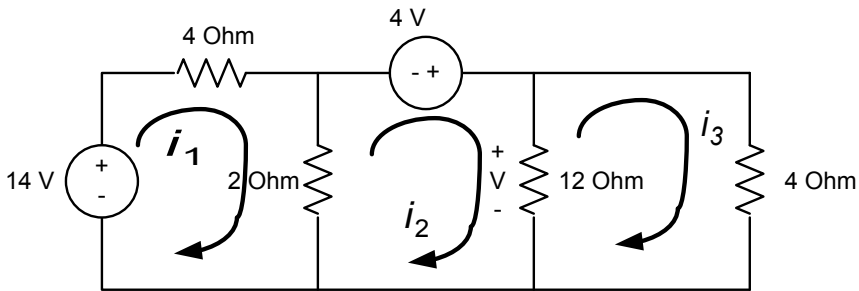
$$4 = 2.(i_2 - i_1) + 12.(i_2 - i_3)$$

$$4 = -2.i_1 + 14.i_2 - 12.i_3$$

Persamaan tegangan pada *loop*-3 diperoleh

$$0 = 12.(i_3 - i_2) + 4.i_3$$

$$0 = -12.i_2 + 16.i_3 \Rightarrow i_3 = \frac{3}{4}i_2$$



Dengan memasukkan persamaan tegangan pada *loop*-3 ke persamaan tegangan *loop*-2 dihasilkan

$$4 = -2.i_1 + 14.i_2 - 12.i_3 \Rightarrow 4 = -2.i_1 + 14.i_2 - 12.\left(\frac{3}{4}i_2\right)$$

$$\Rightarrow 4 = -2.i_1 + 14.i_2 - 9.i_2$$

$$\Rightarrow 4 = -2.i_1 + 5.i_2$$

Dengan eliminasi persamaan di atas dan persamaan tegangan *loop*-1

$$14 = 6.i_1 - 2.i_2 \quad 14 = 6.i_1 - 2.i_2$$

$$\underline{4 = -2.i_1 + 5.i_2} \Rightarrow \underline{12 = -6.i_1 + 15.i_2}$$
$$26 = 13.i_2$$

$$\Rightarrow i_2 = 2 \text{ A}$$

$$\Rightarrow i_1 = 3 \text{ A}$$

$$\Rightarrow i_3 = \frac{3}{4}i_2 = \frac{3}{4} \cdot 2$$

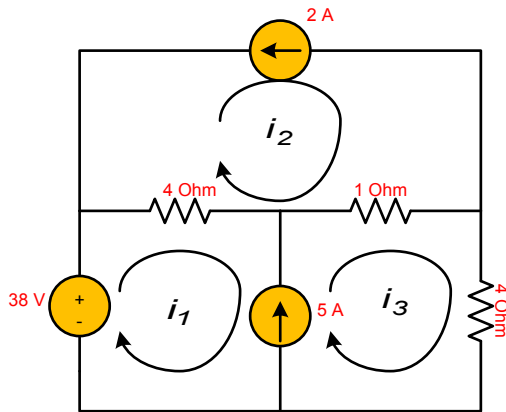
$$\Rightarrow i_3 = 1,5 \text{ A}$$



Maka  $v = 12.(i_2 - i_3) = 12.(1,5 - 2) = -6 \text{ Volt}$

### Latihan-2.5

Pada Gambar-2.12 disajikan rangkaian dengan sumber arus dan sumber tegangan. Tentukan nilai arus dan daya pada resistor 3 Ohm dengan menggunakan metoda Mesh Current.

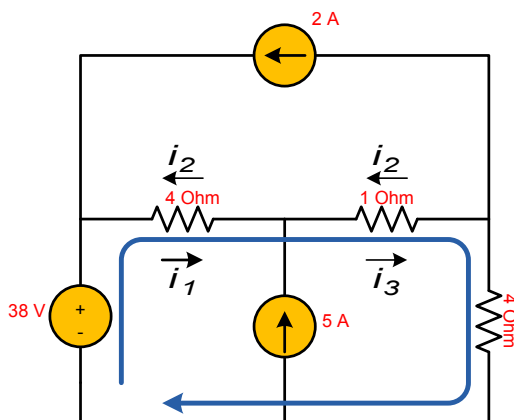


Gambar-2.12 Rangkaian untuk Latihan-2.5

### Jawab-2.5

Dengan memperhatikan Gambar-2.12 maka terdapat tiga buah *loop* arus. Arus pada *loop* yang memiliki sumber arus akan memiliki hubungan berikut

$$\begin{aligned}
 i_2 &= -2 \text{ Ampere} \\
 i_3 - i_1 &= 5 \text{ Ampere} \\
 \Rightarrow i_1 &= i_3 - 5
 \end{aligned}$$



Selanjutnya dengan menggunakan dua *loop* (*loop*-1 dan *loop*-3) akan dapat diturunkan persamaan tegangan dengan mengacu pada KVL

$$4.(i_1 - i_2) + (i_3 - i_2) + 3.i_3 = 38$$

$$4.i_1 - 4.i_2 + i_3 - i_2 + 3.i_3 = 38$$

$$4.i_1 - 5.i_2 + 4.i_3 = 38$$

$$4.(i_3 - 5) - 5.(-2) + 4.i_3 = 38$$

$$4.i_3 - 20 + 10 + 4.i_3 = 38$$

$$8.i_3 = 38 + 10 = 48$$

$$i_3 = 6 \text{ Ampere}$$

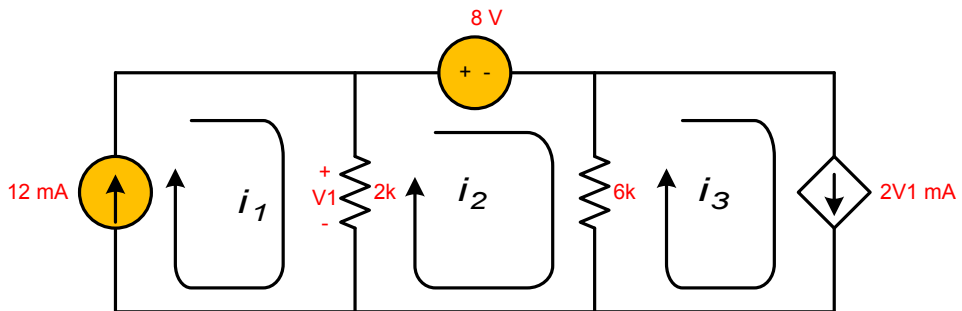
Daya pada resistor 3 ohm dihitung sebagai berikut

$$P = (i_3)^2 R = (6)^2 3$$

$$P = 36.3 = 108 \text{ Watt}$$

### Latihan-2.6

Pada Gambar-2.13 disajikan rangkaian yang mengandung sumber arus tak bebas. Tentukan tegangan V1 dari rangkaian tersebut.



Gambar-2.13 Rangkaian untuk Latihan-2.6



### Jawab-2.6

Memperhatikan Gambar-2.13 maka pada *loop*-1, diperoleh hubungan

$$i_1 = 12 \text{ mA}$$

Sedangkan pada *loop*-3 dapat ditentukan hubungan arus

$$i_3 = 2V_1 \text{ mA} = 2.2000.(i_1 - i_2) \text{ mA}$$

$$i_3 = 4000.(i_1 - i_2) \text{ mA}$$

$$i_3 = 4.(i_1 - i_2) \text{ A}$$

Persamaan tegangan yang dapat diturunkan pada *loop*-2 dengan menggunakan KVL adalah sebagai berikut

$$2000.(i_2 - i_1) + 6000.(i_2 - i_3) = -8$$

$$-2000.i_1 + 8000.i_2 - 6000.i_3 = -8$$

$$-2000.(i_1) + 8000.i_2 - 6000.[4.(i_1 - i_2)] = -8$$

$$-2000.(i_1) + 8000.i_2 - 24000.i_1 + 24000.i_2 = -8$$

$$-26000.(i_1) + 32000.i_2 = -8$$

$$-312 + 32000.i_2 = -8$$

$$32000.i_2 = 304$$

$$i_2 = \frac{304}{32000} = 9,5 \text{ mA}$$

Maka tegangan  $V_1$  dapat ditentukan

$$V_1 = 2000.(i_1 - i_2)$$

$$V_1 = 2000.(12 - 9,5) \text{ mA}$$

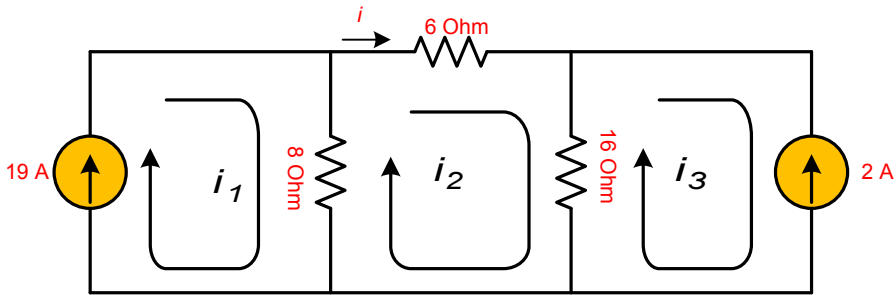
$$V_1 = (2)(2,5) = 5 \text{ Volt}$$

### Latihan-2.7

Pada Gambar-2.14 disajikan rangkaian yang mengandung dua sumber arus. Tentukan nilai arus  $i$  dari rangkaian tersebut.







Gambar-2.14 Rangkaian untuk Latihan-2.7

### Jawab-2.7

Memperhatikan Gambar-2.14 maka pada *loop-1*, diperoleh hubungan

$$i_1 = 19 \text{ A}$$

$$i_3 = -2 \text{ A}$$

Persamaan pada *loop-2* diperoleh

$$8.(i_2 - i_1) + 6.i_2 + 16.(i_2 - i_3) = 0$$

$$8.i_2 - 8.i_1 + 6.i_2 + 16.i_2 - 16.i_3 = 0$$

$$30.i_2 - 8.i_1 - 16.i_3 = 0$$

$$30.i_2 - 8.(19) - 16.(-2) = 0$$

$$30.i_2 - 152 + 32 = 0$$

$$30.i_2 - 120 = 0$$

$$30.i_2 = 120$$

$$i_2 = 4 \text{ Ampere}$$

### Daftar Pustaka

1. Johnson, D. E, Johnson, J. R, Hilburn, J. L.. (1992) : *Electric Circuit Analysis*, Prentice-Hall International Edition
2. Kariis, S. T. (-) : *Circuit Analysis I*, Orchard Publication, California
3. Lucas, J. R. (-) : *Network Theorems*
4. Sudirham, S. (-) : *Analisis Rangkaian Listrik*



**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**

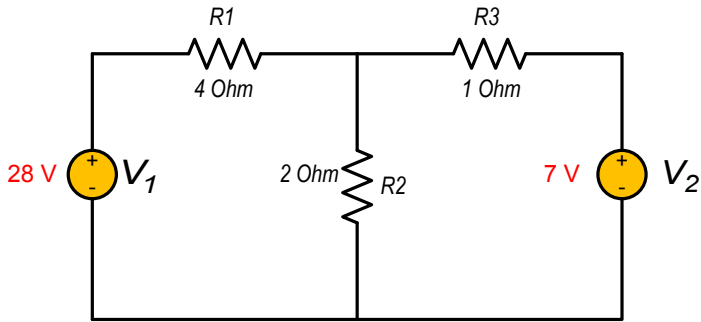
## ***Teorema Superposisi, Thevenin dan Norton***

### 3.1 PENDAHULUAN

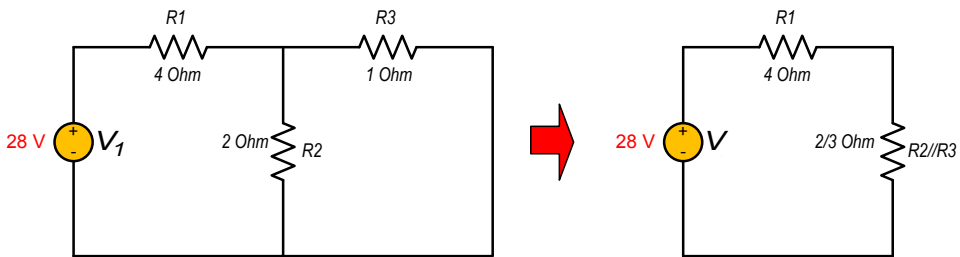
Hukum Kirchhoff memegang peranan penting dalam analisis suatu rangkaian listrik. Metoda lain yang dapat digunakan untuk melakukan analisis rangkaian listrik adalah Superposisi, di mana pada metoda ini jika dalam suatu rangkaian terdapat beberapa sumber maka hanya satu sumber yang akan dianalisis dengan menghilangkan sumber lainnya. Konsep lain yang digunakan adalah Thevenin, di mana suatu beban yang dianalisis akan dihilangkan sementara sedangkan rangkaian yang tersisa nantinya digantikan oleh rangkaian thevenin yang terdiri sumber tegangan dan sebuah resistor dihubung seri. Jika rangkaian pengganti berupa sumber arus yang dihubung paralel dengan resistor maka dinamakan konsep Norton.

### 3.2 TEOREMA SUPERPOSISI

Jika dalam satu rangkaian listrik terdapat lebih dari satu sumber tegangan atau sumber arus maka dengan teorema Superposisi dapat diuraikan atau dianalisis dengan menghilangkan beberapa sumber kecuali salah satu sumber tersebut. Sumber tegangan dapat dieliminasi melalui dihubung singkat sedangkan sumber arus dapat dieliminasi dengan dibuka (open circuit). Untuk memudahkan pemahaman maka pada Gambar-3.1 disajikan suatu rangkaian yang memiliki dua buah sumber tegangan. Konsep Superposisi dapat dilakukan dengan menghilangkan tegangan  $V_2$  sehingga menjadi rangkaian pada Gambar-3.2



Gambar-3.1 Rangkaian dengan dua buah sumber tegangan



Gambar-3.2 Rangkaian ekuivalen dengan menghilangkan tegangan  $V_2$

Dengan mengacu gambar di atas maka arus yang disebabkan oleh tegangan adalah sebesar

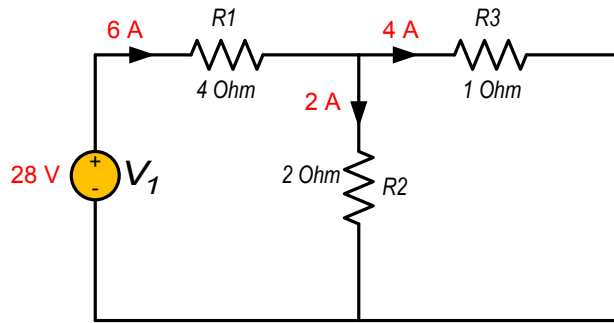
$$i_1 = \frac{28}{4 + \frac{2}{3}} = \frac{28}{\frac{14}{3}} = 6 \text{ Ampere} \quad (3-1)$$

Mengacu pada persamaan (3-1) dapat dibuat tabel arus dan tegangan pada ketiga resistansi

Tabel-3.1 Tegangan dan arus pada resistansi akibat  $V_1$

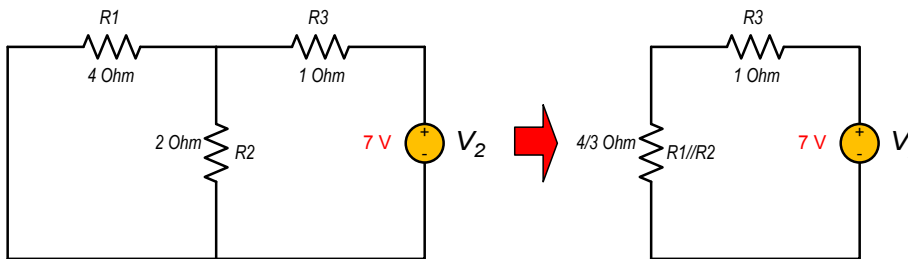
Resistansi	4 Ohm	2 Ohm	1 Ohm
Tegangan	24 Volt	4 Volt	4 Volt
Arus	6 A	2 A	4 A





Gambar-3.3 Arus yang mengalir pada rangkaian akibat tegangan  $V_1$

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah dengan menghilangkan  $V_1$  tegangan dengan tetap menyisakan tegangan  $V_2$  seperti pada Gambar-3.4



Gambar-3.4 Rangkaian ekuivalen dengan menghilangkan tegangan  $V_1$

Dengan mengacu Gambar-3.4 maka arus yang disebabkan oleh tegangan adalah sebesar

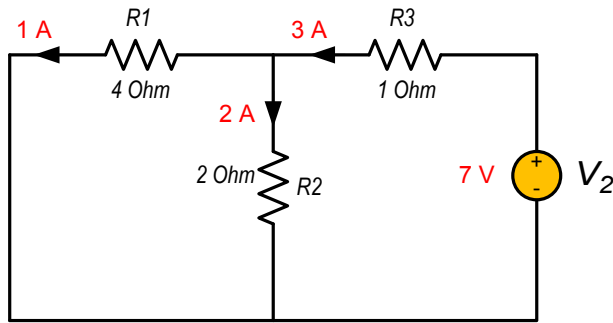
$$i_1 = \frac{7}{4 + \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3}}} = \frac{7}{\frac{7}{3}} = 3 \text{ Ampere} \quad (3-2)$$

Mengacu pada persamaan (3-2) dapat dibuat tabel arus dan tegangan pada ketiga resistansi

Tabel-3.2 Tegangan dan arus pada resistansi akibat  $V_2$

Resistansi	4 Ohm	2 Ohm	1 Ohm
Tegangan	4 Volt	4 Volt	3 Volt
Arus	1 A	2 A	3 A



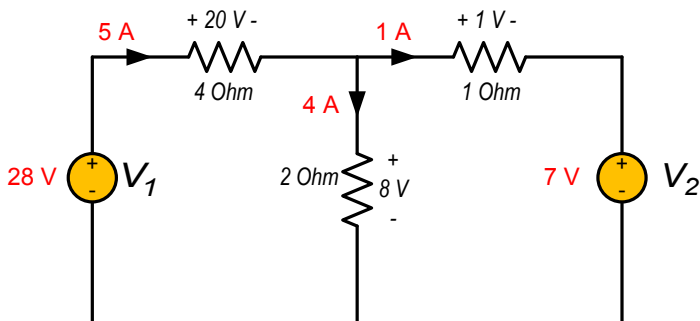


Gambar-3.5 Arus yang mengalir pada rangkaian akibat tegangan  $V_2$

Dengan menggunakan rangkaian pada Gambar-3.3 dan Gambar-3.5 maka arus dan tegangan pada masing-masing resistor akibat tegangan  $V_1$  dan  $V_2$  dapat ditentukan seperti pada Tabel-3.3.

Tabel-3.3 Tegangan dan arus pada resistansi akibat  $V_1$  dan  $V_2$

Resistansi	4 Ohm	2 Ohm	1 Ohm
Tegangan	20 Volt	8 Volt	1 Volt
Arus	(6-1) A	(2+2) A	(4-3) A



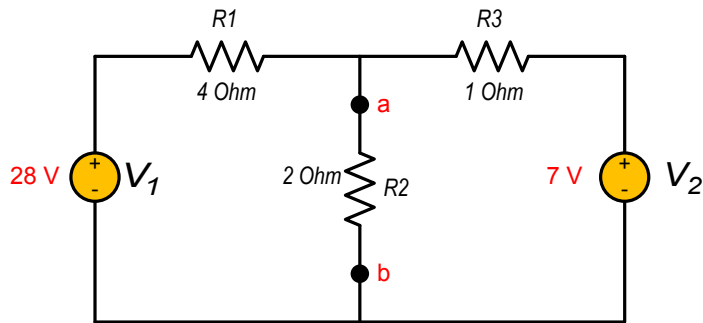
Gambar-3.6 Arus dan tegangan pada rangkaian akibat tegangan  $V_1$  dan  $V_2$

### 3.3 TEOREMA THEVENIN

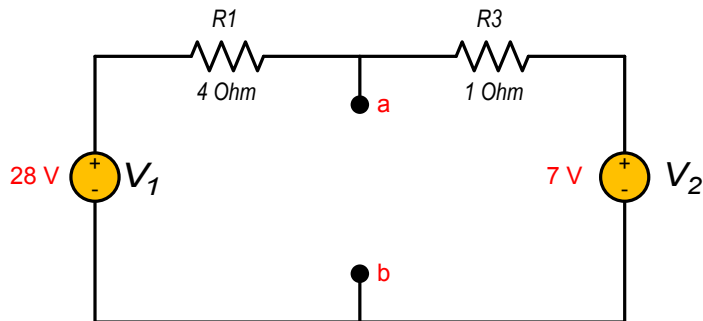
Jika dalam suatu rangkaian yang akan dianalisis terdapat beberapa resistansi maka jika salah satu resistor diambil akan terdapat dua terminal. Rangkaian yang tersisa dapat digantikan oleh sebuah sumber tegangan dan sebuah resistansi yang terhubung seri, rangkaian pengganti ini dinamakan rangkaian Thevenin. Untuk mempermudah pemahaman maka pada Gambar-3.7 ditunjukkan rangkaian yang akan dianalisis dengan menggunakan teorema Thevenin. Resistansi  $R_2$  pada rangkaian tersebut akan dihilangkan



(Gambar-3.8) dan selanjutnya pada terminal a-b akan dicari rangkaian pengganti Thevenin.



Gambar-3.7 Rangkaian yang akan dianalisis dengan teorema Thevenin



Gambar-3.8 Rangkaian dengan R2 dihilangkan

Selanjutnya untuk menentukan rangkaian ekuivalen Thevenin dapat dilakukan dengan konsep Superposisi. Dengan hanya menggunakan tegangan  $V_1$  (Gambar-3.9) maka

$$i_1 = \frac{28}{4+1} = \frac{28}{5}$$

$$i_1 = 5,6 \text{ Ampere}$$

Tegangan pada terminal a-b ditentukan sebagai berikut

$$V_{ab} = 28 - (5,6)(4) = 28 - 22,4$$

$$V_{ab} = 5,6 \text{ Volt}$$

Sedangkan hanya dengan menggunakan tegangan  $V_2$  (Gambar-3.10) maka

$$i_2 = \frac{7}{4+1} = \frac{7}{5}$$

$$i_2 = 1,4 \text{ Ampere}$$



Tegangan pada terminal a-b ditentukan sebagai berikut

$$V_{ab} = 7 - (1,4)(1) = 7 - 1,4$$

$$V_{ab} = 5,6 \text{ Volt}$$

Sehingga dengan menggunakan tegangan  $V_1$  dan  $V_2$  maka tegangan pada terminal a-b ditentukan sebesar

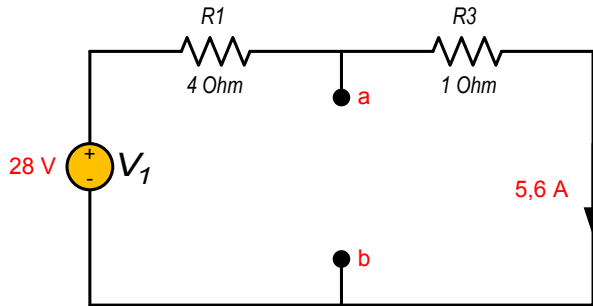
$$V_{ab} = 5,6 + 5,6 = 11,2 \text{ Volt}$$

Tegangan terminal a-b ini yang dinamakan tegangan Thevenin. Untuk menentukan resistansi Thevenin dilakukan dengan menghilangkan semua sumber tegangan dan menghitung resistansi pada terminal a-b. Dari Gambar-3.11 dapat ditentukan nilainya sebagai berikut

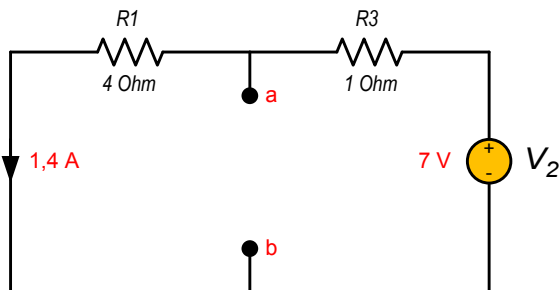
$$R_{TH} = R_1 \parallel R_3$$

$$R_{TH} = \frac{4 \cdot 1}{4 + 1} = \frac{4}{5}$$

$$R_{TH} = 0,8 \text{ Ohm}$$



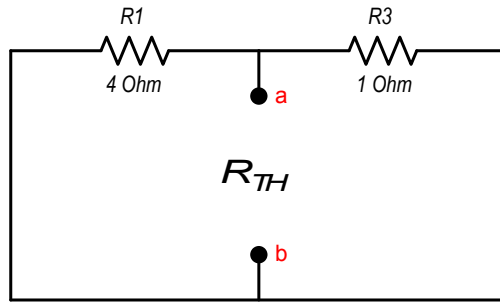
Gambar-3.9 Rangkaian dengan  $R_2$  dan  $V_2$  dihilangkan



Gambar-3.10 Rangkaian dengan  $R_2$  dan  $V_1$  dihilangkan

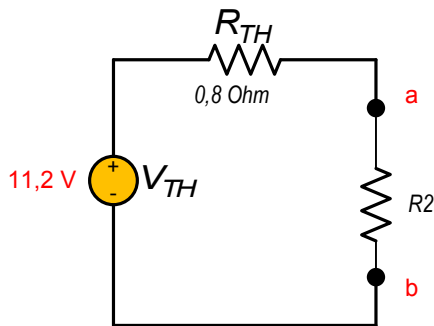






Gambar-3.11 Rangkaian tanpa sumber tegangan untuk menentukan  $R_{TH}$

Dengan menggunakan rangkaian ekuivalen Thevenin yang sudah ditentukan dan mengembalikan  $R_2$  maka akan diperoleh hasil seperti ditunjukkan Gambar-3.12.



Gambar-3.12 Rangkaian ekuivalen Thevenin dengan  $R_2$  terpasang

### 3.4 TEOREMA NORTON

Jika dalam teorema Thevenin ditampilkan suatu sumber tegangan yang dipasang seri dengan resistansi maka pada teorema Norton akan ditampilkan suatu sumber arus yang dipasang paralel dengan suatu resistansi. Dalam rangkaian listrik, suatu resistansi dapat dihilangkan sementara dengan rangkaian yang tersisa digantikan oleh rangkaian ekuivalen Norton. Dengan mengacu pada Gambar-3.7 yang dapat dianalisis dengan menggunakan teorema Thevenin maka dalam sub-bab ini akan dijabarkan dengan menggunakan teorema Norton. Dengan menghilangkan tahanan  $R_2$  dan menghubungkan singkat terminal a-b maka arus Norton merupakan arus yang melalui terminal a-b (Gambar-3.13). Karena pengaruh tegangan 28 Volt, arus Norton dapat diturunkan dengan persamaan berikut

$$I_{NT\_1} = \frac{28}{4} = 7 \text{ Ampere}$$



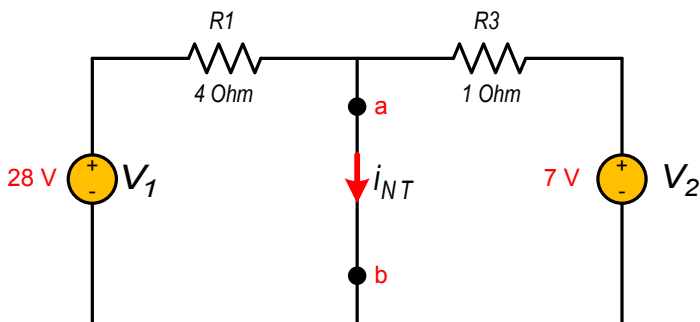
Sedangkan arus Norton akibat adanya tegangan 7 Volt dapat dinyatakan dengan

$$I_{NT\_2} = \frac{7}{1} = 7 \text{ Ampere}$$

Karena kedua arus yang ditentukan di atas memiliki arah sama maka arus Norton akibat kedua sumber tegangan dinyatakan dengan

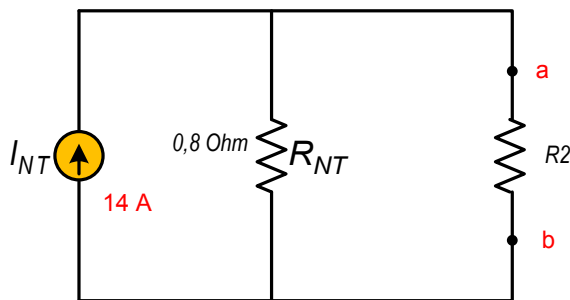
$$I_{NT} = I_{NT\_1} + I_{NT\_2}$$

$$I_{NT} = \frac{28}{4} + \frac{7}{1} = 7 + 7 = 14 \text{ Ampere}$$



Gambar-3.13 Menghubung singkat terminal a-b untuk menentukan arus Norton

Sedangkan resistansi Norton ditentukan sama seperti dalam menentukan resistansi Thevenin, sehingga dalam kasus ini  $R_{NT} = R_{TH}$ . Akhirnya rangkaian ekuivalen Norton dapat dihasilkan seperti pada Gambar-3.14.



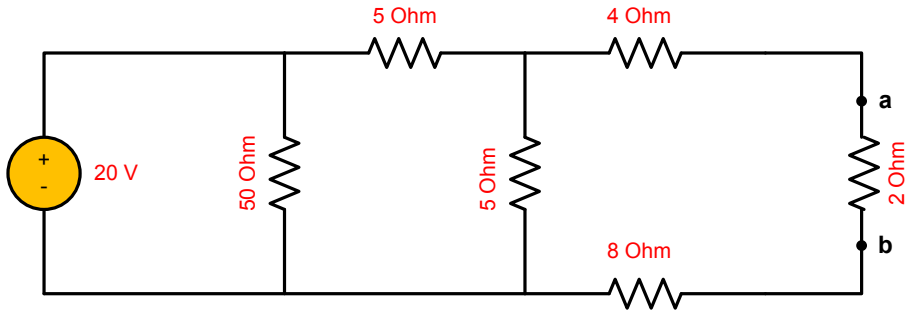
Gambar-3.14 Resistansi R2 dihubungkan dengan rangkaian ekuivalen Norton



### 3.5 LATIHAN

#### Latihan-3.1

Tentukan daya pada resistor 2 Ohm dari Gambar-3.15 dengan menggunakan teorema Thevenin

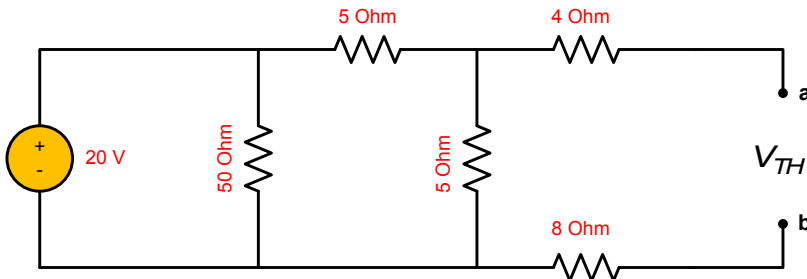


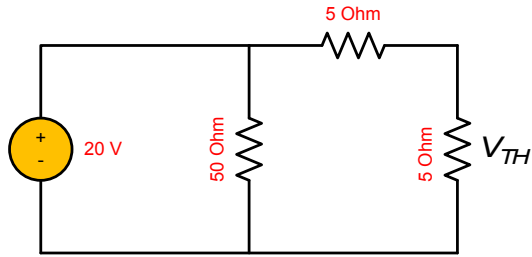
Gambar-3.15 Rangkaian untuk Latihan-3.1

#### Jawab-3.1

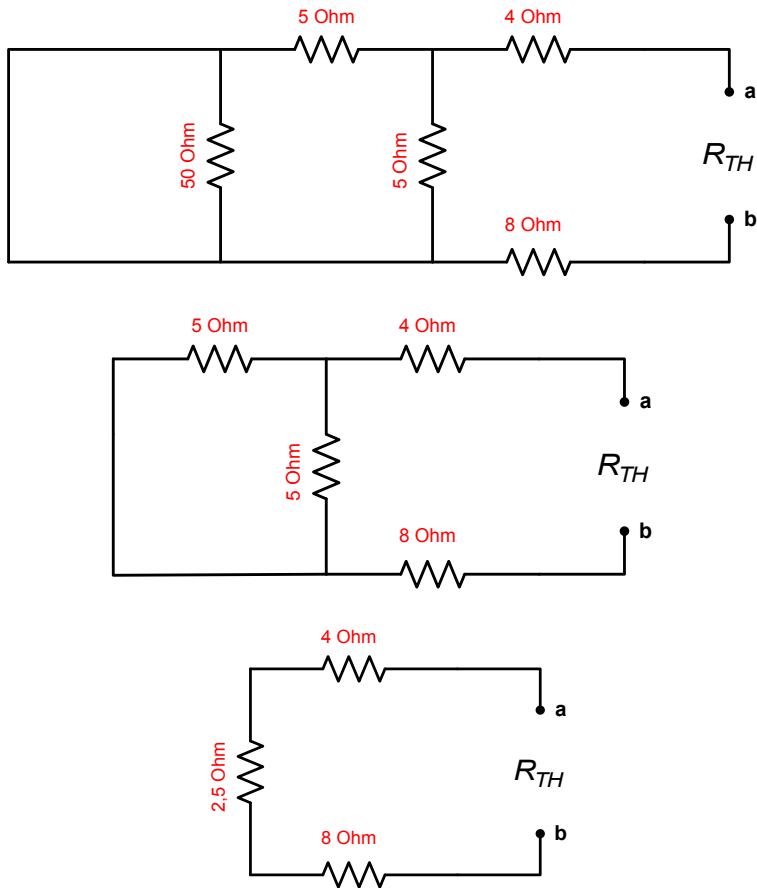
Untuk menyelesaikan dengan menggunakan teorema Thevenin maka resistor 2 Ohm harus dihilangkan sementara dan terminal a-b dibiarkan terbuka untuk menentukan tegangan Thevenin. Karena resistor 4 Ohm dan 8 Ohm tidak dilalui arus maka tegangan Thevenin sama dengan tegangan pada resistor 5 Ohm. Resistor dengan nilai 50 Ohm dipasang paralel dengan sumber tegangan 20 Volt sehingga tegangan pada resistor 5 Ohm sama dengan 20 Volt. Dengan demikian maka tegangan Thevenin dapat ditentukan

$$V_{TH} = \frac{5}{5+5} 20$$
$$V_{TH} = 10 \text{ Volt}$$





Gambar-3.16 Menentukan tegangan Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1



Gambar-3.17 Menentukan resistansi Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1

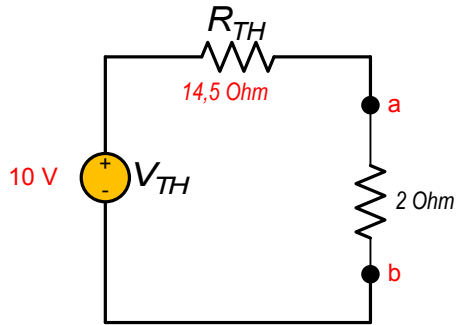
Sedangkan resistansi Thevenin ditentukan dengan

$$R_{TH} = 4 + 8 + 5 // 5$$

$$R_{TH} = 4 + 8 + 2,5$$

$$R_{TH} = 14,5 \text{ Ohm}$$





Gambar-3.18 Rangkaian ekuivalen Thevenin dari rangkaian untuk Latihan-3.1

Dengan mengacu pada rangkaian ekuivalen Thevenin maka arus yang melewati resistor 2 Ohm dapat ditentukan berikut

$$I_{2Ohm} = \frac{10}{14,5 + 2} = \frac{10}{16,5}$$

$$I_{2Ohm} = 0,606 \text{ Ampere}$$

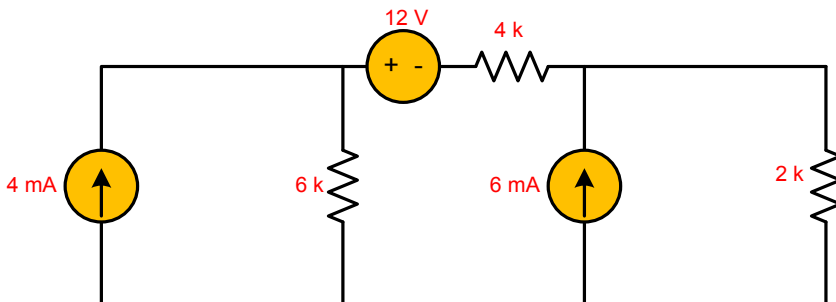
Dengan demikian maka daya pada resistor 2 Ohm adalah

$$P = (I_{2Ohm})^2 2 = (0,606)^2 2$$

$$P = 0,73 \text{ Watt}$$

### Latihan-3.2

Tentukan tegangan pada resistor 2 k-Ohm dengan menggunakan teorema Superposisi dari gambar di bawah ini

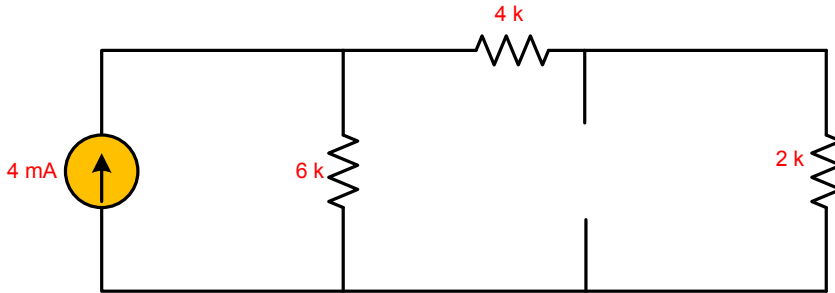


Gambar-3.19 Rangkaian untuk Latihan-3.2



### Jawab-3.2

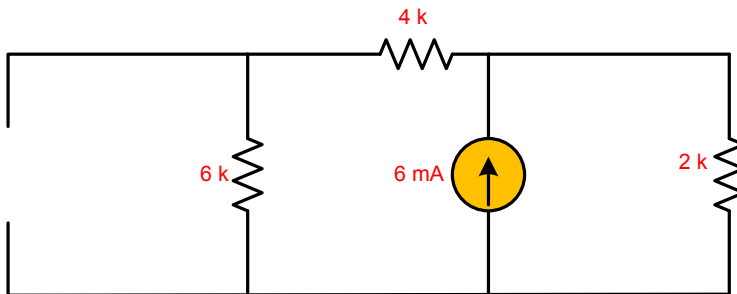
Langkah pertama yang dilakukan adalah menghilangkan sumber tegangan 12 Volt dengan menghubungkan singkat dan menghilangkan sumber arus 6 mA dengan membukanya, sehingga diperoleh rangkaian berikut



Karena resistor 4 k-Ohm dan 2 k-Ohm terhubung seri maka jumlahnya adalah 6 k-Ohm, sehingga dengan pembangian arus diperoleh arus yang lewat resistor 2 k-Ohm adalah sebesar

$$i_{2k(1)} = \frac{6k}{6k + 6k} 4 \text{ mA} = 2 \text{ mA}$$

Langkah kedua yang dilakukan adalah menghilangkan sumber tegangan 12 Volt dengan menghubungkan singkat dan menghilangkan sumber arus 4 mA dengan membukanya, sehingga diperoleh rangkaian berikut

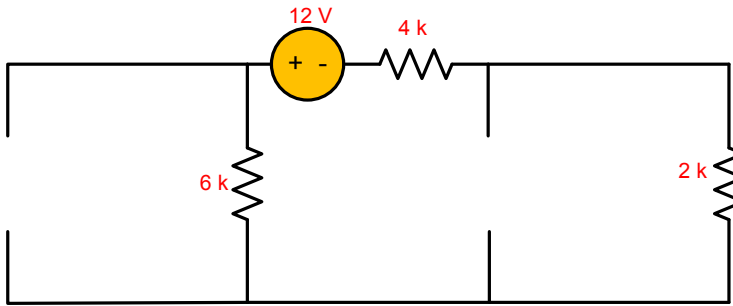


sehingga dengan pembangian arus diperoleh arus yang lewat resistor 2 k-Ohm adalah sebesar

$$i_{2k(2)} = \frac{10k}{6k + 6k} 6 \text{ mA} = 5 \text{ mA}$$

Langkah ketiga yang dilakukan adalah menghilangkan kedua sumber arus 4 mA dan 6 mA dengan membukanya, sehingga diperoleh rangkaian berikut





sehingga dengan pembangian arus diperoleh arus yang lewat resistor 2 k-Ohm adalah sebesar

$$i_{2k(3)} = -\frac{12}{12k} = -1 \text{ mA}$$

Selanjutnya dengan menjumlahkan ketiga arus di atas diperoleh

$$\begin{aligned} i_{2k} &= i_{2k(1)} + i_{2k(2)} + i_{2k(3)} \\ i_{2k} &= 2 \text{ mA} + 5 \text{ mA} - 1 \text{ mA} \\ i_{2k} &= 6 \text{ mA} \end{aligned}$$

Dan akhirnya tegangan pada resistor 2 k-Ohm diperoleh

$$\begin{aligned} v_{2k} &= R_{2k} \cdot i_{2k} \\ v_{2k} &= (2k)(6 \text{ mA}) = 12 \text{ Volt} \end{aligned}$$

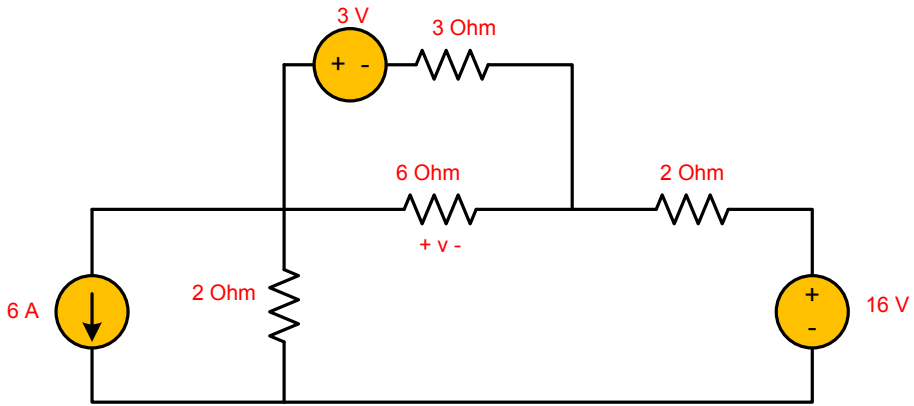
### Latihan-3.3

Tentukan tegangan pada resistor 6 Ohm dengan menggunakan teorema Superposisi dari gambar di bawah ini

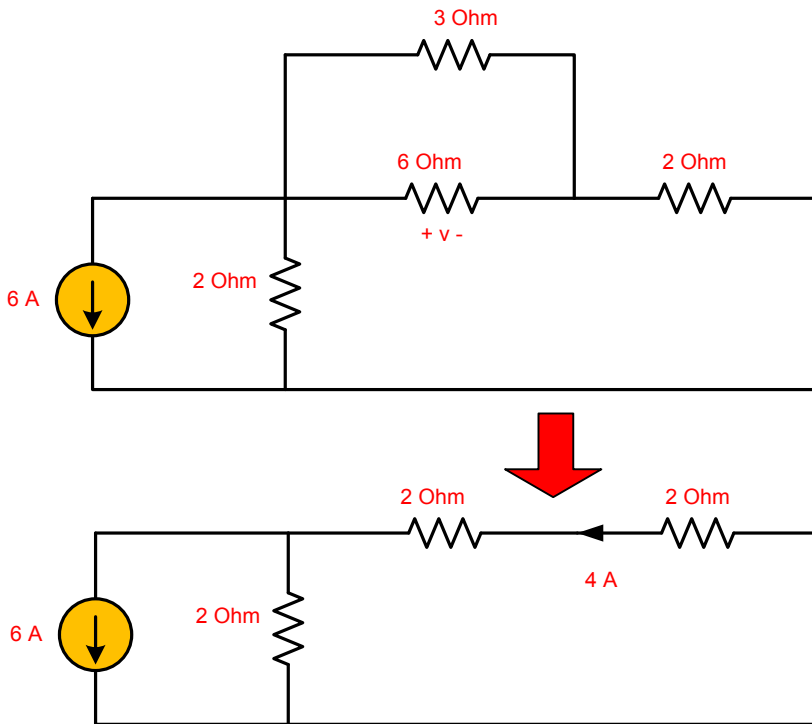
### Jawab-3.3

Langkah pertama yang dilakukan adalah menghilangkan sumber tegangan 3 Volt dan 16 Volt dengan menghubungkan singkat. Dengan mengacu pada rangkaian dengan sebuah sumber arus maka diperoleh arus yang mengalir pada resistor 6 Ohm sebagai berikut





Gambar-3.20 Rangkaian untuk Latihan-3.3



Karena resistor 3 Ohm dan 6 Ohm terhubung paralel maka dapat digantikan resistor sebesar

$$R_3 \parallel R_6 = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = \frac{18}{9} = 2 \text{ Ohm}$$

Dengan memperhatikan polaritas tegangan  $v$  pada resistor 6 Ohm maka arus yang melalui resistor 2 Ohm sebesar

$$i_{2(1)} = \frac{2}{6} = -6 \text{ A} = -2 \text{ A}$$

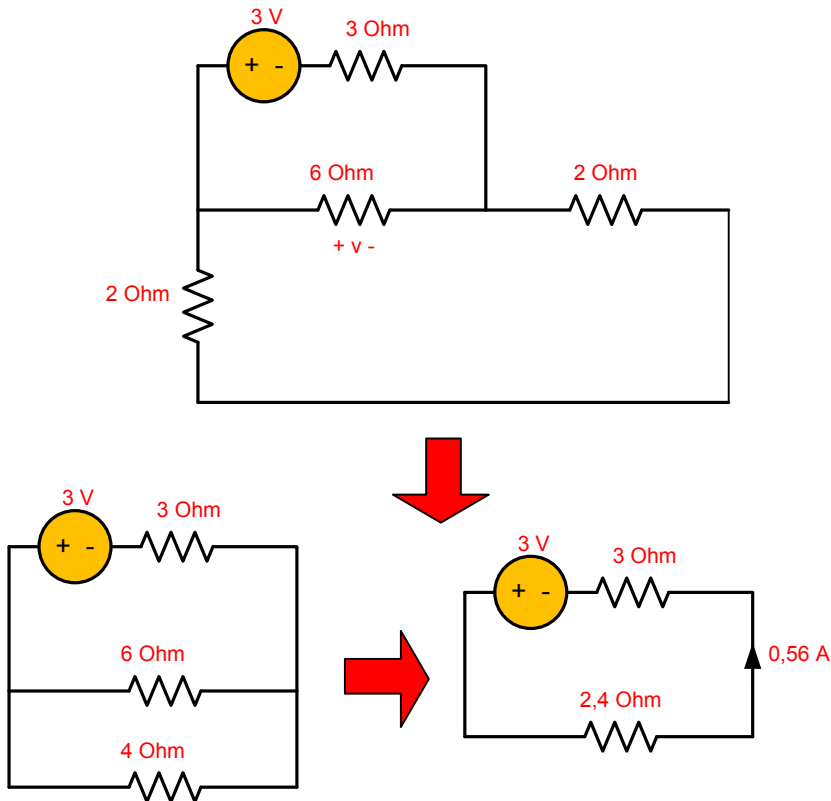




Maka arus yang melalui resistor 6 Ohm sebesar

$$i_{6(1)} = \frac{3}{3+6} = -2 \text{ A} = -\frac{2}{3} \text{ A}$$

Langkah kedua dilakukan dengan menghilangkan sumber arus 6 A melalui hubung buka dan sumber tegangan 16 Volt dengan menghubungkan singkat maka diperoleh arus yang mengalir pada resistor 6 Ohm sebagai berikut



Resistor 2 Ohm terhubung seri dengan resistor 2 Ohm sehingga dapat digantikan dengan resistor 4 Ohm. Selanjutnya resistor ini (4 Ohm) terhubung paralel dengan resistor 6 Ohm dengan nilai akuivalen sebesar

$$R_4 \parallel R_6 = \frac{4 \times 6}{4 + 6} = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ Ohm}$$

Sehingga arus yang mengalir pada resistor 3 Ohm sebesar

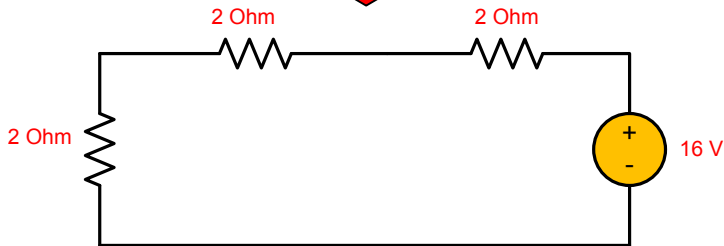
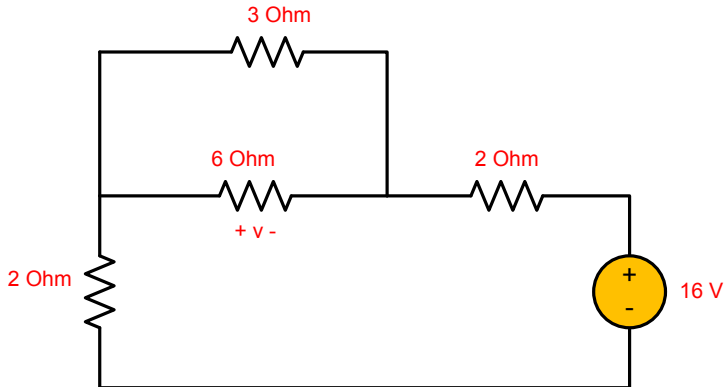
$$i_{3(2)} = \frac{3}{3+2,4} = 0,56 \text{ A}$$

Maka arus yang melalui resistor 6 Ohm sebesar



$$i_{6(2)} = \frac{4}{4+6} = 0,5 \quad A = 0,224 \quad A$$

Langkah berikutnya dilakukan dengan menghilangkan sumber arus 6 A dan sumber tegangan 3 Volt dengan tetap menyisakan sumber tegangan 16 Volt.



Arus yang mengalir keluar sumber tegangan 16 Volt adalah sebesar

$$i_{(3)} = \frac{16}{6} = 2,67 \quad A$$

Dengan mengacu pada polaritas  $v$  maka arus yang mengalir melalui resistor 6 Ohm sebesar

$$i_{6(3)} = -\frac{3}{3+6} 2,67 \quad A = -0,89 \quad A$$

Selanjutnya dengan menjumlahkan ketiga arus di atas diperoleh

$$\begin{aligned} i_6 &= i_{6(1)} + i_{6(2)} + i_{6(3)} \\ i_6 &= -0,67 \quad A + 0,224 \quad A - 0,89 \quad A \\ i_6 &= -1,336 \quad A \end{aligned}$$



Dan akhirnya tegangan pada resistor 6-Ohm diperoleh

$$v_6 = R_6 \cdot i_6$$

$$v_{2k} = (6)(-1,336 \text{ A}) = -8,016 \text{ Volt}$$

### Daftar Pustaka

1. Johnson, D. E, Johnson, J. R, Hilburn, J. L.. (1992) : *Electric Circuit Analysis*, Prentice-Hall International Edition
2. Kariis, S. T. (-) : *Circuit Analysis I*, Orchard Publication, California
3. Lucas, J. R. (-) : *Network Theorems*
4. Sudirham, S. (-) : *Analisis Rangkaian Listrik*



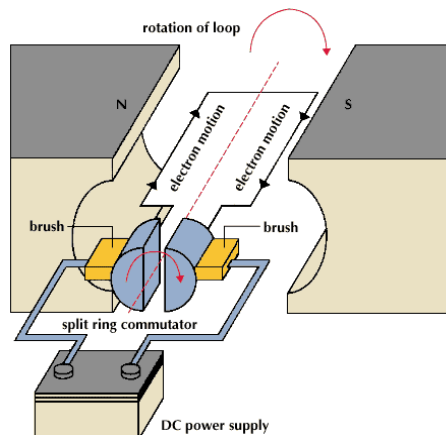
**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**

## Dasar Motor DC

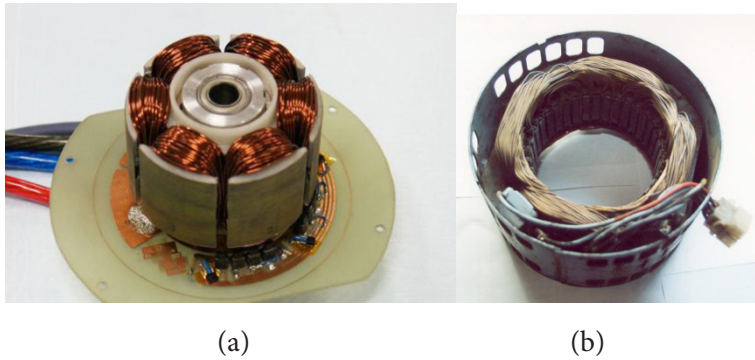
### 4.1. MOTOR DC

Motor DC dapat berputar atas dasar Gaya Lorentz yang menyatakan jika suatu konduktor dialiri arus yang berada pada medan magnet akan mendapat gaya. Karena konduktor terletak pada bagian rotor yang berputar maka untuk mengalirkan arus diperlukan elemen berupa sikat (brush) dan komutator (Gambar-4.1). Komutator dibelah menjadi dua dengan tujuan untuk pembalikan arus. Setiap kali konduktor di dekat kutub medan magnet tertentu akan memiliki arah arus yang sama. Medan magnet dihasilkan oleh stator, dapat berasal dari magnet permanen ataupun elektromagnet. Pada motor DC ukuran kecil banyak digunakan magnet permanen pada stator sedangkan untuk ukuran besar lebih sesuai dipakai belitan untuk menghasilkan medan magnet.

Pada Gambar-4.2a ditunjukkan bagian rotor dari motor DC yang di dalamnya terdapat belitan jangkar untuk dialiri arus sedangkan pada Gambar-4.2b tampak stator berupa belitan untuk menghasilkan medan magnet.



Gambar-4.1.Prinsip motor DC [4]



*Gambar-4.2. Bagian motor DC (a) rotor (b) stator dengan belitan [5], [6]*

Pada Gambar-4.3 disajikan rangkaian ekuivalen suatu motor DC penguatan terpisah di mana diperlukan dua buah sumber tegangan DC untuk rangkaian jangkar (pada rotor) dan rangkaian medan (pada stator). Tegangan medan  $V_f$  diperlukan oleh rangkaian medan guna membangkitkan medan magnet stator (fluksi stator  $\Phi_s$ ) sedangkan tegangan  $V_t$  diperlukan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor (fluksi rotor  $\Phi_r$ ). Interaksi kedua fluksi tersebut akan menghasilkan torca motor  $T_m$  yang selanjutnya dipakai memutar motor.

Persamaan sesaat yang dapat diturunkan dengan mengacu pada Gambar-4.3 adalah sebagai berikut :

Persamaan nilai sesaat pada stator

$$v_f(t) = i_f(t)R_f + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (4-1)$$

Persamaan nilai sesaat pada rotor

$$v_t(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (4-2)$$

di mana

$R_a$  = tahanan jangkar pada rotor (Ohm)

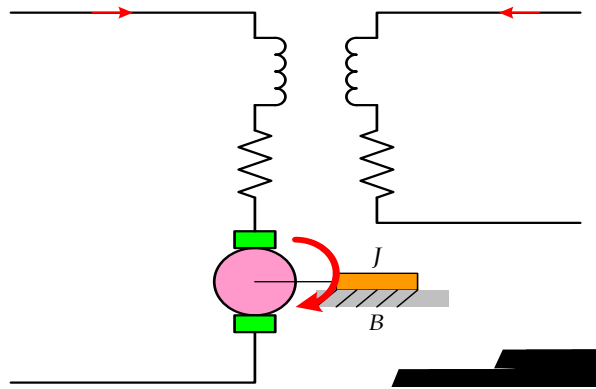
$R_f$  = tahanan rangkaian medan pada stator (Ohm)

$L_a$  = induktansi jangkar pada rotor (Henry)

$L_f$  = induktansi rangkaian medan pada stator (Henry)



- $e_a$  = nilai sesaat tegangan induksi (Volt)
- $v_t$  = nilai sesaat tegangan terminal rotor (Volt)
- $v_f$  = nilai sesaat tegangan terminal stator (Volt)
- $i_f$  = nilai sesaat arus medan/stator (A)
- $i_a$  = nilai sesaat arus jangkar/rotor (A)



Gambar-4.3. Rangkaian ekuivalen motor DC penguatan terpisah

Pada kondisi tunak (steady-state) maka nilai  $d/dt$  dapat dianggap sama dengan nol sehingga persamaan (4-1) dan (4-2) menjadi

Persamaan kondisi tunak pada stator

$$V_f = I_f R_f \quad (4-3)$$

Persamaan kondisi tunak pada rotor

$$V_t = I_a R_a + E_a \quad (4-4)$$

di mana

- $E_a$  = nilai rata-rata tegangan induksi (Volt)
- $V_t$  = nilai rata-rata tegangan terminal rotor (Volt)
- $V_f$  = nilai rata-rata tegangan terminal stator (Volt)



$I_f$  = nilai rata-rata arus medan/stator (A)

$I_a$  = nilai rata-rata arus jangkar/rotor (A)

Pada motor DC tegangan induksi  $E_a$  sering dinamakan tegangan putar karena nilai tegangan ini dipengaruhi kecepatan putar motor ( $\omega_r$ ), dinyatakan dengan

$$E_a = K \phi I_f \omega_r \quad (4-5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4-5) ke dalam persamaan (4-4) akan didapatkan

$$\begin{aligned} V_t &= I_a R_a + E_a \\ &= I_a R_a + K \phi I_f \omega_r \\ \omega_r &= \frac{V_t - I_a R_a}{K \phi I_f} \end{aligned} \quad (4-6)$$

Jika nilai  $R_a$  cukup kecil maka diperoleh

$$\omega_r = \frac{V_t - I_a R_a}{K \phi I_f} \quad (4-7)$$

Agar supaya rotor suatu motor dapat berputar maka diperlukan torka pada poros motor, dan dinyatakan dengan persamaan

$$T_m = \frac{P_{out}}{\omega_r} = \frac{E_a I_a}{\omega_r} \quad (4-8)$$

di mana

$T_m$  = Torka motor (N-m)

$P_{out}$  = Daya keluaran motor (Watt)

$\omega_r$  = kecepatan putar motor (rad/dt)

## 4.2 JENIS MOTOR DC

Berdasarkan hubungan antara belitan stator dan belitan rotor maka motor DC dapat diklasifikasikan menjadi

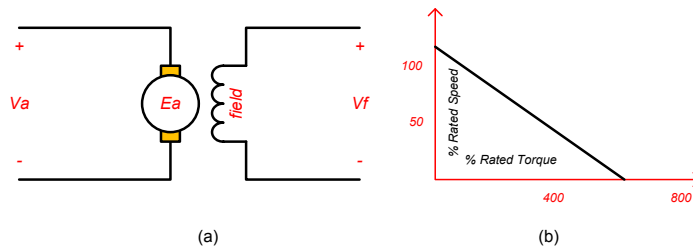
- Motor DC penguatan terpisah
- Motor DC penguatan seri



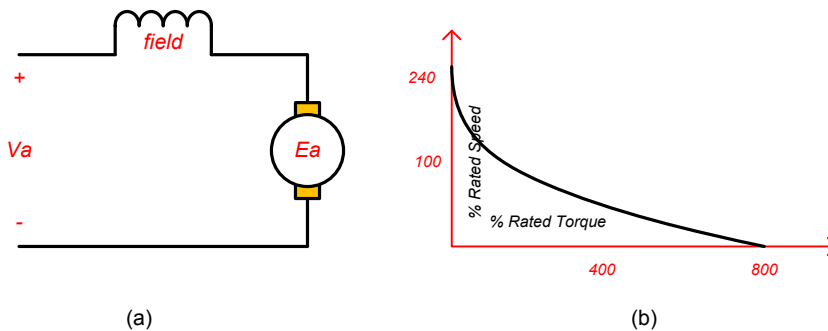


- Motor DC penguatan shunt
- Motor DC penguatan Compound

Suatu motor DC penguatan terpisah memerlukan dua buah sumber tegangan DC yang dipakai untuk belitan stator dan belitan rotor (Gambar-4.4). Karakteristik kecepatan terhadap torka memiliki kelinieran yang baik. Pada Gambar-4.5 disajikan rangkaian ekuivalen dari motor DC penguatan seri, di mana belitan rotor dan belitan stator dihubungkan secara seri. Dari karakteristiknya tampak bahwa motor DC jenis ini memiliki torka awal yang sangat besar sehingga sesuai untuk menggerakkan beban berat atau beban lain yang diputar pada kecepatan rendah



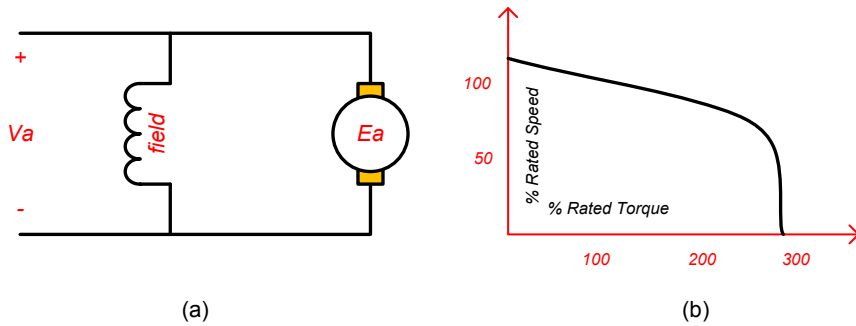
Gambar-4.4. Motor DC penguatan terpisah (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik



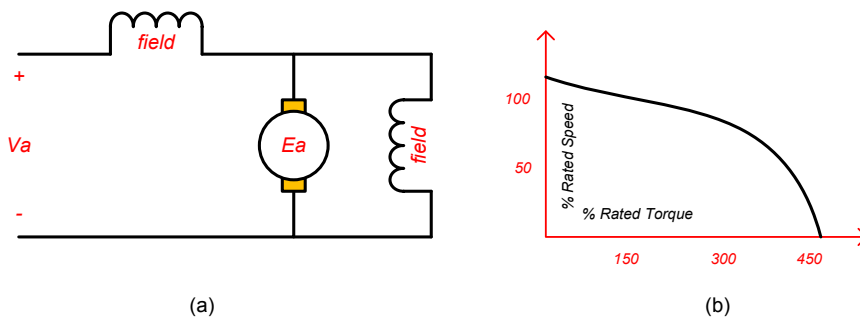
Gambar-4.5. Motor DC penguatan seri (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik

Pada motor DC dengan penguatan shunt maka belitan rotor dan belitan stator memiliki hubungan paralel (Gambar-4.6). Motor DC jenis ini memiliki torka yang relatif konstan pada range kecepatan yang cukup luas. Motor DC juga tersedia dengan dua belitan medan yang dihubungkan secara seri dan paralel, motor jenis ini adalah motor DC penguatan compound. Karakteristik motor jenis ini merupakan kombinasi antara motor DC jenis seri dan motor DC jenis shunt (Gambar-4.7).





Gambar-4.6. Motor DC penguatan shunt (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik



Gambar-4.7. Motor DC penguatan Compound (a) rangkaian ekuivalen (b) kurva karakteristik

### 4.3 BELITAN PADA MOTOR DC

Motor DC memiliki belitan-belitan yang terletak pada rotor dan stator. Belitan yang terletak pada rotor sering dinamakan belitan jangkar (armature winding) dan belitan yang terdapat pada medan dinamakan belitan medan (field winding). Dalam motor DC belitan selalu tertutup, yang mengandung makna bahwa setiap kumparan atau coil (yang memiliki dua ujung) akan terhubung secara seri hingga membentuk rangkaian tertutup. Setiap ujung kumparan akan tersambung pada segmen komutator. Setiap segmen komutator akan terisolasi dengan segmen yang berdekatan. Setiap kumparan akan memiliki dua sisi yang masing-masing sisi akan berada dalam satu slot. Kedua slot yang berisi kumparan akan terpisah sejauh 180 derajat listrik. Sebagai contoh jika dimisalkan terdapat 20 slot dengan 4 kutub kumparan maka jarak slot untuk tiap sisi kumparan sebesar  $(20/4=5)$ . Sehingga jika sisi satu kumparan diletakkan pada slot-1 maka sisi kumparan yang lainnya diletakkan pada slot 6 (1+5).

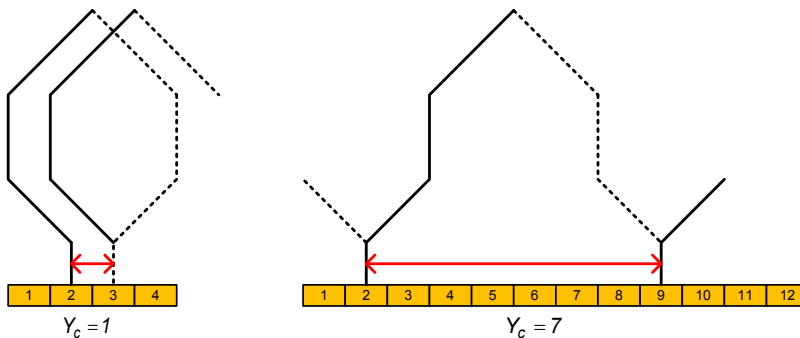


Untuk lebih memahami belitan motor DC maka perlu diperhatikan beberapa istilah, di antaranya adalah

Commutator Pitch ( $Y_c$ ), yaitu jumlah segmen komutator yang menghubungkan kedua ujung kumparan (Gambar-4.8)

Coil Span atau Coil Pitch atau jarak kumparan ( $Y_s$ ), yaitu jarak antara dua sisi kumparan yang diukur dalam jumlah slot (Gambar-4.9)

Pole Pitch, yaitu jarak antar kutub yang diukur dalam jumlah slot. Dimisalkan suatu motor memiliki 4 kutub dan 16 kumparan maka akan terdapat 16 kumparan (karena jumlah segmen komutator = jumlah kumparan), dengan demikian Pole Pitch =  $16/4 = 4$  slot



Gambar-4.8. Commutator Pitch

Dalam merancang belitan jangkar motor DC maka perlu dipahami prosedur yang dapat membantu. Beberapa rumus yang dapat dipakai sebagai acuan adalah sebagai berikut

Jika jumlah slot adalah S dan jumlah kutub P maka jarak kumparan (coil pitch) =  $Y_s = \frac{S}{P}$

untuk simplex lap winding dan simplex wave winding jarak kumparan sama dengan coil pitch

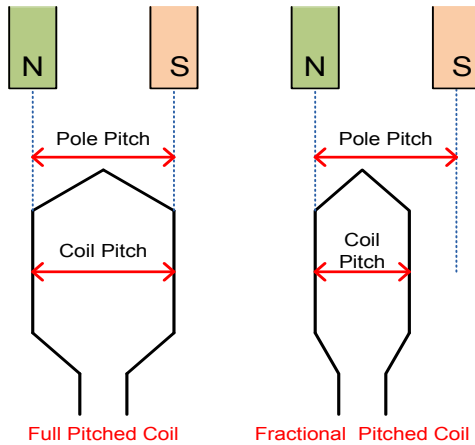
Commutator pitch :

$Y_c = \pm 1$  untuk belitan jenis lap winding

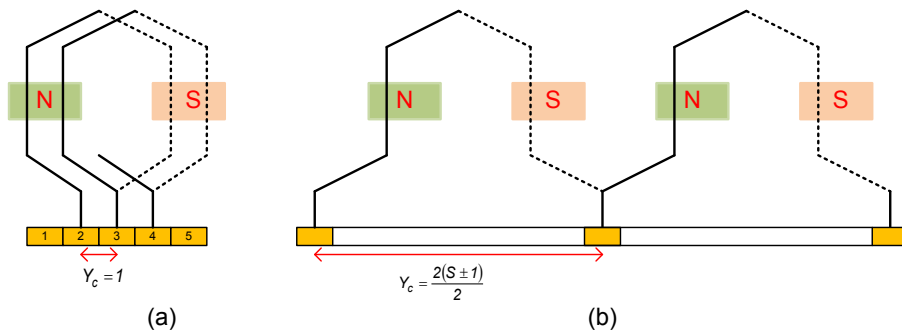
$Y_c = \frac{2(S \pm 1)}{P}$  untuk belitan jenis wave winding



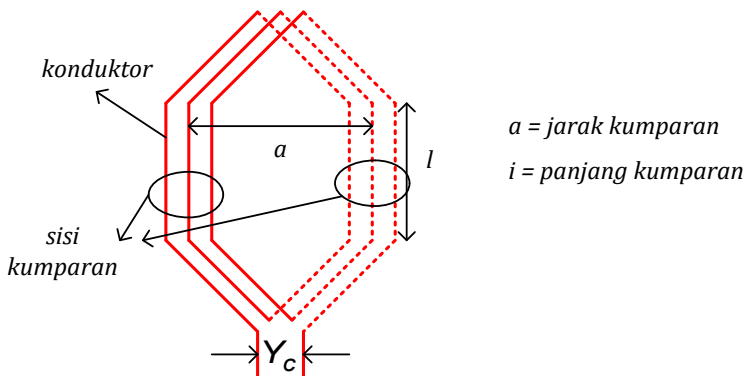
Sebagai pengetahuan tambahan maka pada Gambar-4.11 disajikan suatu kumparan yang terdiri dari 3 lilitan konduktor. Kumparan memiliki dua sisi di mana masing-masing sisi kumparan akan diletakkan ke dalam slot yang berbeda dengan jarak tertentu.



Gambar-4.9. Pole Pitch dan Coil Pitch

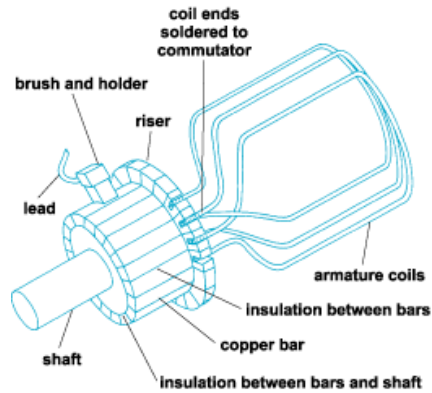


Gambar-4.10. Belitan jangkar (a) lap winding (b) wave winding



Gambar-4.11. Kumparan (coil) memiliki dua sisi dan terdiri dari 3 lilitan konduktor





Gambar-4.12. Pemasangan belitan pada segmen komutator dan posisi sikat [7]

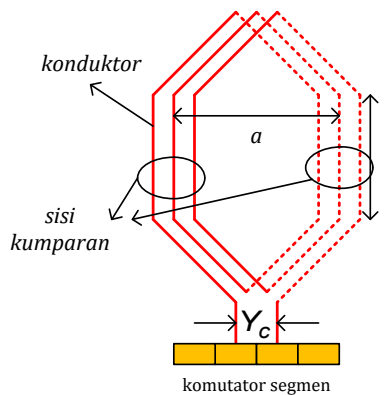
## Lap Winding

Belitan jenis lap winding memiliki beberapa ciri yang dapat dijadikan acuan, di antaranya adalah kedua ujung kumparan selalu menempati segmen komutator yang berdekatan (Gambar-4.13)

jumlah jalur paralel sama dengan jumlah kutub

jumlah sikat sama dengan jumlah kutub magnet

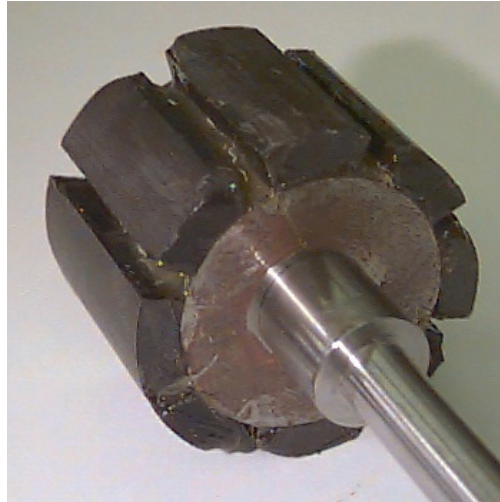
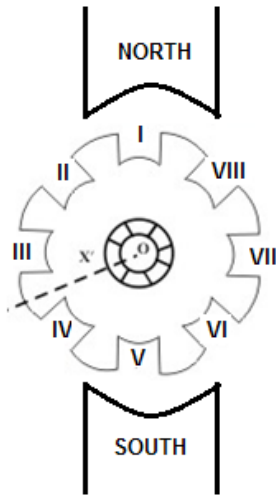
digunakan untuk arus lebih besar dan tegangan lebih rendah



Gambar-4.13. Sebuah kumparan dengan dua sisi yang terdiri dari tiga konduktor

Untuk lebih mamahami secara lebih rinci maka pada Gambar-4.14 disajikan suatu rotor motor DC dengan 8 ( $S = 8$ ) slot. Jika motor memiliki 2 kutub magnet ( $P = 2$ ) maka jarak kumparan (coil span) ditentukan dengan rumus  $\frac{8}{2} = 4$ . Kondisi ini berarti jika salah satu sisi kumparan berada pada slot-1 maka sisi kumparan yang lain terletak pada slot-5





Gambar-4.14. Rotor motor DC dengan 8 buah slot dan 8 segmen komutator [8]

Dimisalkan terdapat 8 buah kumparan (K-1, K-2,... K-8) maka akan terdapat 16 sisi kumparan. Dengan adanya 8 buah slot maka tiap slot akan berisi 2 sisi kumparan dari kumparan yang berbeda. Dari Gambar-4.14 dapat diuraikan sebagai berikut

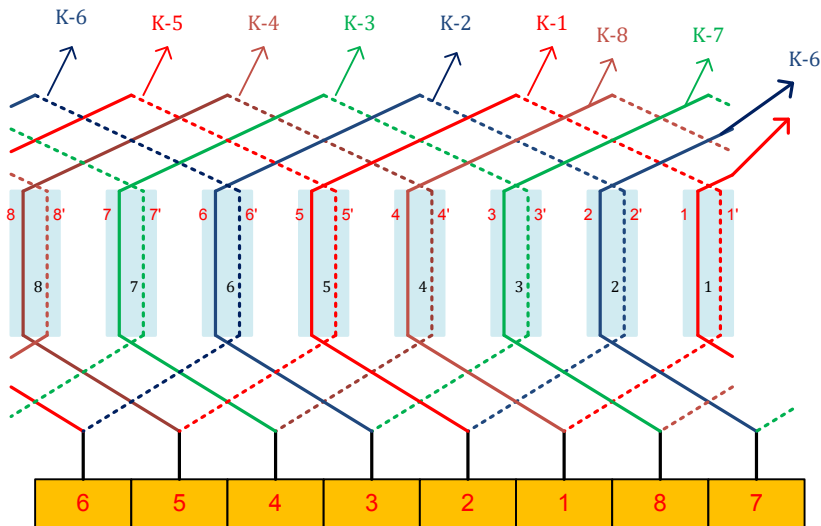
Kumparan K-1 yang kedua ujungnya dihubungkan dengan segmen komutator-1 dan segmen komutator-2, sisi-sisi kumparan K-1 akan menempati slot-1 dan slot-5

Kumparan K-2 yang kedua ujungnya dihubungkan dengan segmen komutator-2 dan segmen komutator-3, sisi-sisi kumparan K-2 akan menempati slot-2 dan slot-6

Kumparan K-3 yang kedua ujungnya dihubungkan dengan segmen komutator-3 dan segmen komutator-4, sisi-sisi kumparan K-2 akan menempati slot-3 dan slot-7. Kumparan selanjutnya dapat diperhatikan menurut Gambar-4.15

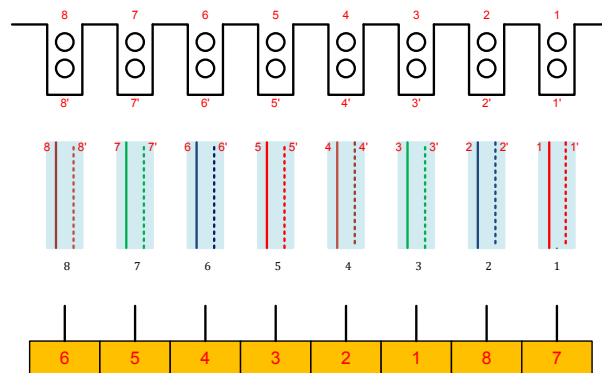
Gambar-4.15 menunjukkan tiap slot terdapat dua buah kumparan yang tersusun di bagian atas dan dibagian bawah. Untuk memudahkan dalam penyajian biasanya digambarkan dengan dua buah garis, yaitu garis tebal (kumparan di bagian atas) dan garis putus-putus (kumparan bagian bawah) seperti tampak pada Gambar-4.16.





Gambar-4.15. Struktur belitan pada rotor dengan 8 slot, 8 segmen komutator dan 2 kutub magnet

Dengan mengacu pada Gambar-4.16 dan Tabel-4.1 maka dapat dibuat kumparan K-1 dengan dua sisi kumparan yang terletak pada slot-1 (kumparan bagian bawah, dinamakan 1') dan slot-5 (kumparan bagian atas, dinamakan 5), kedua ujung kumparan K-1 terhubung pada segmen komutator-1 dan segmen komutator-2. Selanjutnya kumparan K-2 dengan dua sisi kumparan yang terletak pada slot-2 (kumparan bagian bawah, dinamakan 2') dan slot-6 (kumparan bagian atas, dinamakan 6), kedua ujung kumparan K-2 terhubung pada segmen komutator-2 dan segmen komutator-3. Kumparan K-1 dan K-2 terhubung secara seri melalui segmen komutator-2. Kumparan K-3 hingga K-8 juga dibuat sama seperti kumparan K-1 dan K-2 sehingga kedelapan kumparan akan membentuk suatu rangkaian tertutup seperti tampak pada Gambar-4.17.

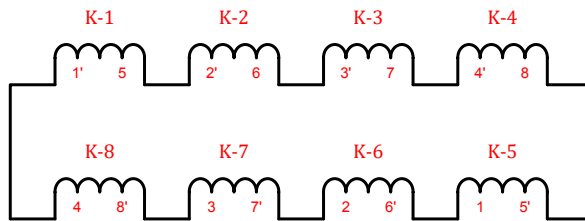


Gambar-4.16. Representasi kumparan pada slot



Tabel-4.1. Penyajian hubungan antar kumparan yang membentuk belitan motor DC jenis lap winding dengan 8 slot dan 2 kutub magnet

NAMA KUMPARAN	KUMPARAN SLOT DIHUBUNGKAN	SEGMENT KOMUTATOR
K-1	1' - 5	1 - 2
K-2	2' - 6	2 - 3
K-3	3' - 7	3 - 4
K-4	4' - 8	4 - 5
K-5	5' - 1	5 - 6
K-6	6' - 2	6 - 7
K-7	7' - 3	7 - 8
K-8	8' - 4	8 - 1



Gambar-4.17. Kumparan-kumparan membantu belitan yang merupakan rangkaian tertutup

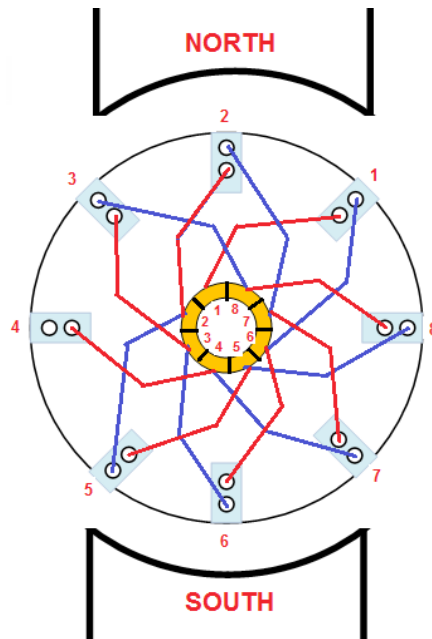
Agar motor DC dapat berputar maka harus ada interaksi antara arus dan medan magnet. Pada Gambar-4.18 disajikan posisi belitan rotor yang akan dialiri arus terhadap medan magnet yang dihasilkan oleh stator. Dengan mengacu pada Gambar-4.19 maka dapat dilihat bahwa slot-1, 2 dan 3 berada di dekat medan magnet utara (North) sedangkan slot-5, 6 dan 7 berada dekat dengan kutub magnet selatan (South). Torque yang mampu memutar motor akan dihasilkan jika arus yang mengalir pada kumparan dalam slot yang berada pada kutub magnet yang sama memiliki arah arus sama. Sebagai contoh : karena kumparan-kumparan yang berada dekat kutub magnet utara memiliki arah masuk maka kumparan-kumparan yang dekat dengan kutub selatan harus memiliki arah arus keluar.

Arus yang berasal dari sikat yang bertegangan positif akan menyebabkan arus mengalir melalui segmen komutator-5 dan segmen komutator-4, selanjutnya mengalir melalui beberapa kumparan dan kembali ke sikat bertegangan negatif melalui segmen komutator-1 dan segmen komutator-8. Dari segmen komutator-5 arus mengalir menuju K-5, K-6, K-7, selanjutnya ke segment komutator-8 dan kembali ke sikat yang bertegangan negatif. Sedangkan Dari segmen komutator-4 arus mengalir menuju K-3, K-2, K-1, selanjutnya ke segment komutator-1 dan kembali ke sikat yang bertegangan negatif.

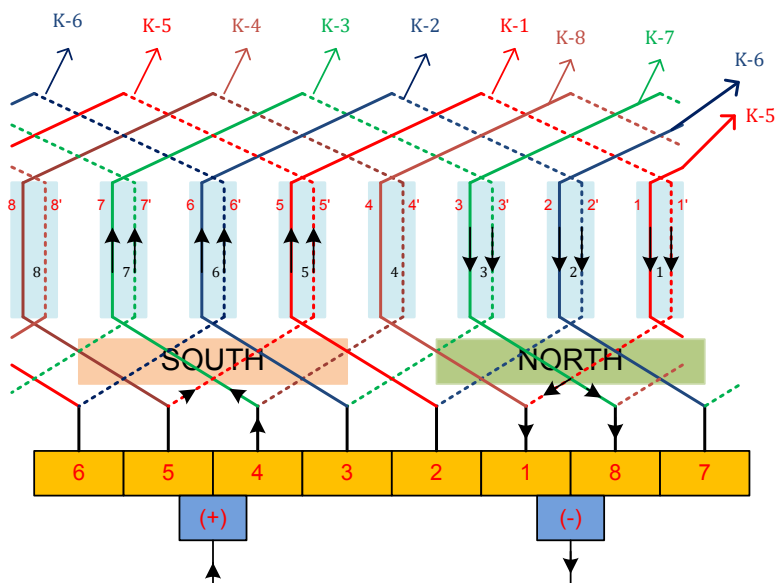




Kumparan K-4 dan K-8 tidak teraliri arus karena kedua ujung kumparan memiliki tegangan yang sama. Rangkaian tertutup yang terbentuk pada kondisi ini disajikan pada Gambar-4.20.

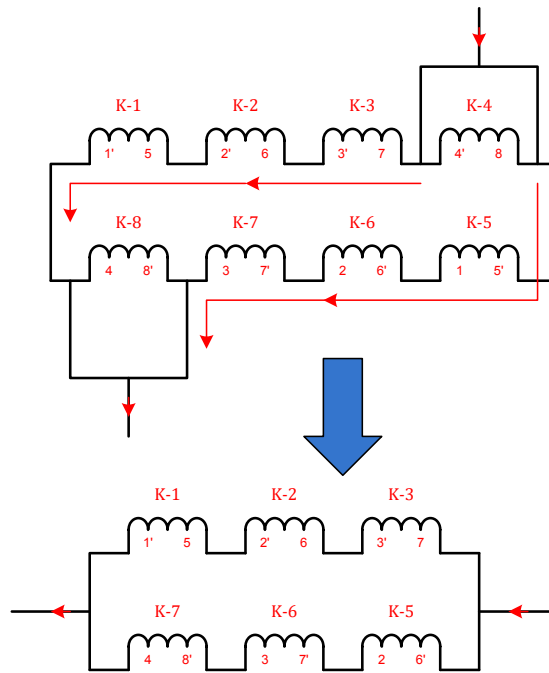


Gambar-4.18. Representasi belitan rotor terhadap medan magnet stator



Gambar-4.19. Aliran arus pada belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-8/1 dan segmen komutator-4/5





Gambar-4.20. Rangkaian ekuivalen belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-1/8 dan segmen komutator-4/5

## Wave Winding

Belitan jenis wave winding, sisi kumparan (konduktor) yang berada dekat dengan kutub magnet tertentu dihubungkan dengan sisi kumparan yang berada dekat kutub magnet lainnya (berlawanan). Belitan jenis ini memiliki beberapa ciri yang dapat dijadikan acuan, di antaranya adalah kedua ujung kumparan menempati segmen komutator yang tidak berdekatan (memiliki jarak tertentu)

jumlah jalur paralel selalu dua

jumlah posisi sikat pada komutator sama dengan dua

digunakan untuk arus kecil dan tegangan lebih besar

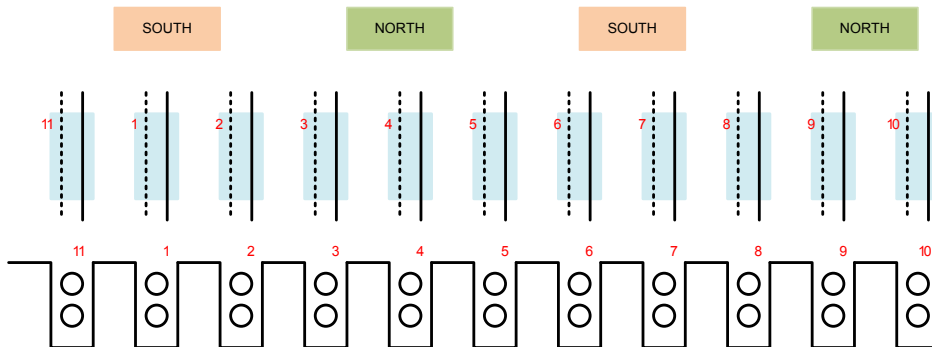
Sebagai contoh maka berikut disajikan suatu belitan jenis wave winding untuk menambah pemahaman. Dimisalkan motor DC memiliki 4 buah kutub magnet ( $P = 4$ ) dengan jumlah slot sebanyak 11 buah ( $S = 11$ ). Dengan demikian maka dapat ditentukan



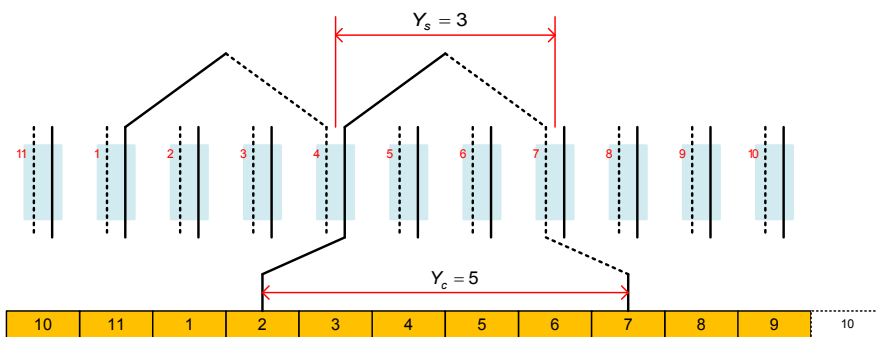
Commutator Pitch sebesar 
$$Y_c = \frac{2(S - 1)}{P} = \frac{2(11 - 1)}{4} = 5$$

Coil Pitch sebesar 
$$Y_s = \frac{(S + 1)}{P} = \frac{(11 + 1)}{4} = 3$$

Pada Gambar-4.21 ditunjukkan diagram dari motor DC tersebut, selanjutnya dengan menggunakan nilai coil pitch sebesar 3 maka sisi-sisi kumparan yang berjarak sepanjang 3 slot dapat dihubungkan. Kondisi ini membuat sisi-sisi kumparan yang terhubung akan memiliki kutub magnet yang berlawanan. Slot-4 berisi dua sisi kumparan, sisi kumparan bagian atas dinamakan dengan sisi kumparan 4 dan di bagian bawah dinamakan sisi kumparan 4'. Dengan menggunakan nilai coil pitch sebesar 3, sisi kumparan dalam slot 4 harus dihubungkan sisi kumparan pada slot-7 atau slot-1 (Gambar-4.22). Dengan cara yang sama diberlakukan untuk semua kumparan maka akan diperoleh hasil belitan jenis wave winding seperti tampak pada Gambar-4.23 dan Tabel-4.2.

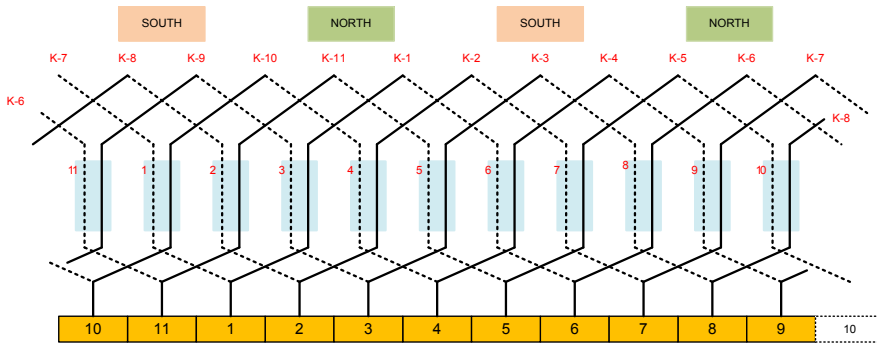


Gambar-4.21. Motor DC dengan 11 slot, 4 kutub magnet



Gambar-4.22. Hubungan 2 sisi kumparan dengan coil pitch = 3 dan commutator pitch = 5





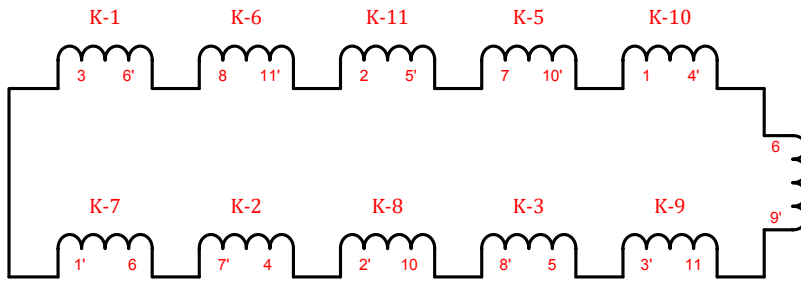
Gambar-4.23. Belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet

Tabel-4.2. Penyajian hubungan antar kumparan yang membentuk belitan motor DC jenis wave winding dengan 8 slot dan 2 kutub magnet

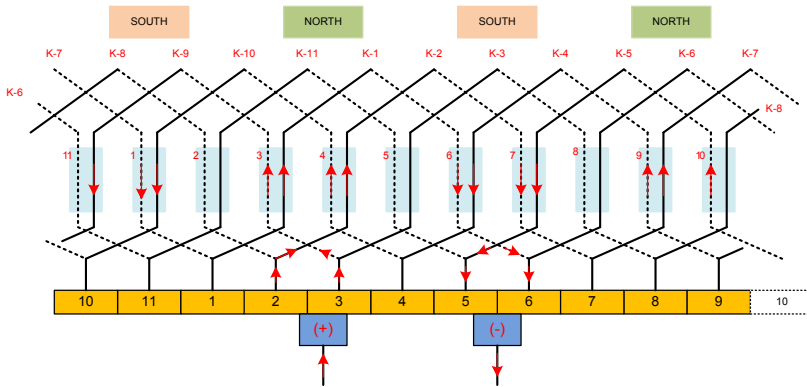
NAMA KUMPARAN	KUMPARAN SLOT DIHUBUNGAN	SEGMENT KOMUTATOR
K-1	3 - 6'	1 - 6
K-6	8 - 11'	6 - 11
K-11	2 - 5'	11 - 5
K-5	7 - 10'	5 - 10
K-10	1 - 4'	10 - 4
K-4	6 - 9'	4 - 9
K-9	11 - 3'	9 - 3
K-3	5 - 8'	3 - 8
K-8	10 - 2'	8 - 2
K-2	4 - 7'	2 - 7
K-7	6 - 1'	7 - 1

Sisi-sisi kumparan yang dihubungkan dengan pola wave winding akan membentuk suatu rangkaian tertutup (Gambar-4.24). Selanjutnya jika terdapat dua buah sikat yang terpisah 90 derajat maka dapat dilihat pada Gambar-4.25





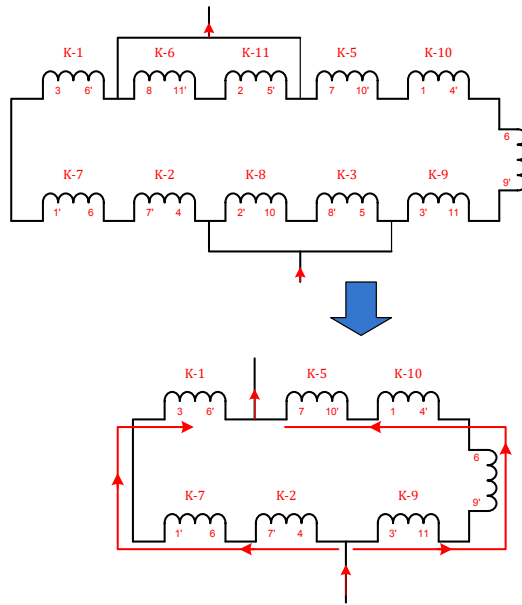
**Gambar-4.24.** Rangkaian ekuivalen belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet



**Gambar-4.25.** Aliran arus dari 2 sikat pada belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet

Rangkaian ekuivalen dari Gambar-4.25 ditunjukkan pada Gambar-4.26, di mana sikat yang menyentuh segmen komutator-2/3 akan menghubungkan-singkat kumparan K-3 dan K-8 sedangkan sikat yang menyentuh segmen komutator-5/6 akan menghubungkan-singkat kumparan K-6 dan K-11.



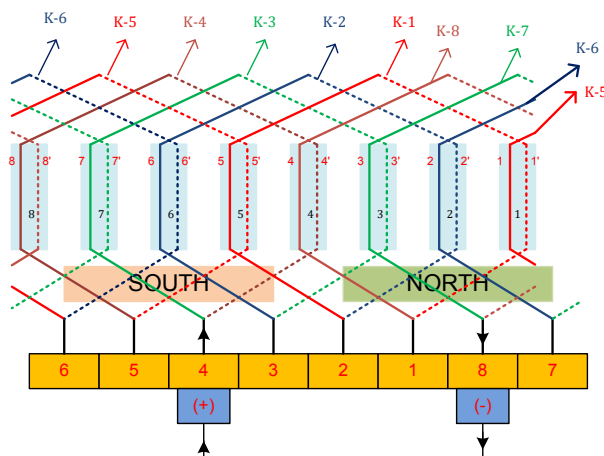


Gambar-4.26. Rangkaian ekuivalen belitan jenis wave winding untuk 11 slot dan 4 kutub magnet saat sikat menyentuh segmen komutator 2/3 dan 5/6

#### 4.4. LATIHAN

##### Latihan-1

Mengacu pada Gambar-4.27, buatlah rangkaian ekuivalen di mana arus mengalir dan jelaskan secara ringkas.



Gambar-4.27. Aliran arus pada belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-4 dan segmen komutator-8

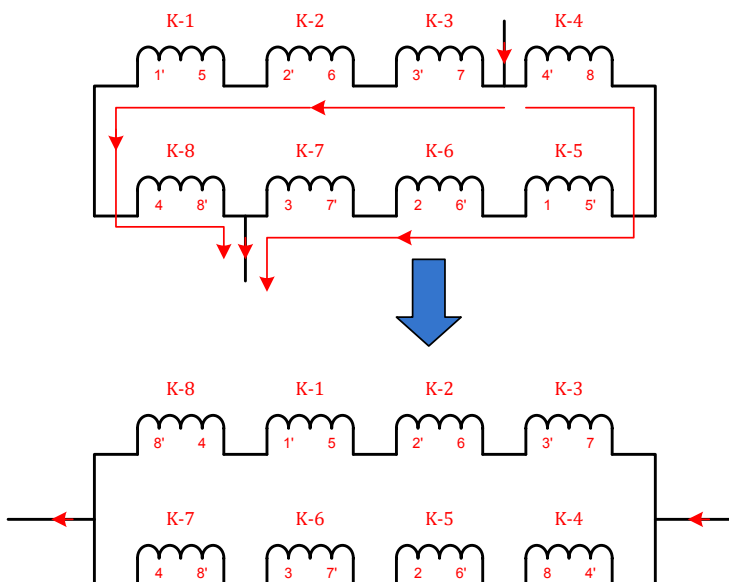


Jawab

Gambar yang menjelaskan tentang posisi kumparan dalam slot dan hubungannya dengan segmen komutator di atas dapat disederhanakan secara jelas pada Tabel di bawah ini (Tabel-4.1). Letak sikat yang menyentuh segmen komutator-4 dapat diartikan bahwa arus bercabang pada kumparan K-3 dan K4.

NAMA KUMPARAN	KUMPARAN SLOT DIHUBUNGGKAN	SEGMENT KOMUTATOR
K-1	1' - 5	1 - 2
K-2	2' - 6	2 - 3
K-3	3' - 7	3 - 4
K-4	4' - 8	4 - 5
K-5	5' - 1	5 - 6
K-6	6' - 2	6 - 7
K-7	7' - 3	7 - 8
K-8	8' - 4	8 - 1

Selanjutnya sikat yang menyentuh segmen komutator-8 diartikan menyebabkan percabangan arus pada kumparan K-7 dan K-8. Rangkaian ekuivalennya ditunjukkan pada Gambar-4.28.



**Gambar-4.28.** Rangkaian ekuivalen belitan rotor saat sikat menyentuh segmen komutator-4 dan segmen komutator-8



## Latihan-2

Rancanglah belitan rotor motor DC yang memiliki 4 slot dengan 2 buah kutub magnet, jenis belitan yang digunakan adalah *lap winding*

Jawab

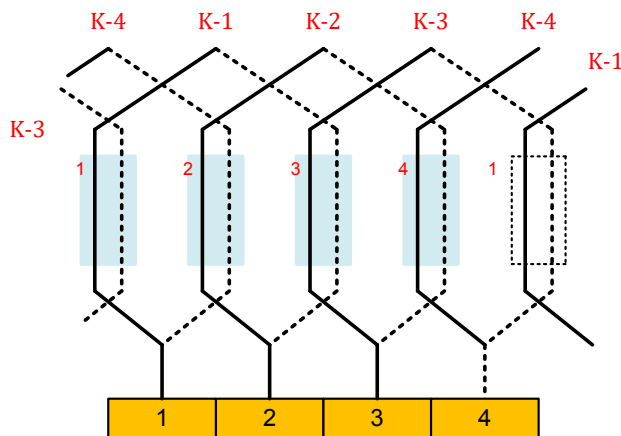
Diketahui  $S = 4$ ,  $P = 2$

Maka :

$$\text{Jarak kumparan (coil pitch)} = Y_s = \frac{S}{P} = \frac{4}{2} = 2$$

*Commutator pitch*  $Y_c = \pm 1$  untuk belitan jenis *lap winding*

Langkah pertama yang dibuat adalah menggambar empat buah slot yang diisi dengan dua sisi kumparan (satu di atas dan satu di bawah). Hubungkan bagian belakang dari sisi kumparan bagian atas pada slot-1 dengan sisi kumparan bawah pada slot-3, sisi kumparan bagian atas pada slot-2 dengan sisi kumparan bawah pada slot-4, sisi kumparan bagian atas pada slot-3 dengan sisi kumparan bawah pada slot-1 dan seterusnya. Hubungkan bagian depan dari sisi kumparan bagian atas pada slot-1 dengan segmen komutator-1 dan sisi kumparan bawah pada slot-3 dengan segmen komutator-2, sisi kumparan bagian atas pada slot-2 dengan segmen komutator-2 dan sisi kumparan bawah pada slot-4 dengan segmen komutator-3, sisi kumparan bagian atas pada slot-3 dengan segmen komutator-3 dan sisi kumparan bawah pada slot-1 dengan segmen komutator-4 dan seterusnya sehingga membentuk rangkaian tertutup.



Gambar-4.29. Hubungan kumparan pada rotor motor DC dengan 4 slot dan 2 kutub magnet





### Latihan-3

Buatlah tabel untuk hubungan kumparan pada Latihan-2 di atas

Jawab

Tabel dapat dibuat dengan mengacu pada Gambar-4.29, di mana kumparan K-1 menghubungkan sisi kumparan atas pada slot-1 dan sisi kumparan bawah pada slot-2, V kumparan K-2 menghubungkan sisi kumparan atas pada slot-2 dan sisi kumparan bawah pada slot-4, dan seterusnya.

NAMA KUMPARAN	KUMPARAN SLOT DIHUBUNGGKAN	SEGMENT KOMUTATOR
K-1	1 - 3'	1 - 2
K-2	2 - 4'	2 - 3
K-3	3 - 1'	3 - 4
K-4	4 - 2'	4 - 1

#### 4.5. TUGAS

Buatlah rancangan belitan *lap winding* untuk rotor motor DC dengan 4 buah slot dan 4 buah kutub magnet.

Buatlah tabelnya dan rangkaian ekuivalen belitan rotor dari soal-1 di atas.

Apa yang dapat dijelaskan perbedaan dalam hal rangkaian ekuivalen antara belitan *lap winding* untuk rotor motor DC dengan 4 buah slot dan 4 buah kutub magnet dengan belitan *lap winding* untuk rotor motor DC dengan 4 buah slot dan 2 buah kutub magnet.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Sarma, M. S., (1985), Electric Machines : Steady-State Theory & Dynamic Performance, West Publishing Company
2. Chapman, S. J., (1991), Electric Machinery Fundamentals, Mc Graw Hill. Inc
3. Stallcup, J. G., (1987), Motor & Transformers, American Technical Publishers
4. <http://photohome.bloguez.com/photohome/1657525/dc-motor>



5. [www.greentechmedia.com](http://www.greentechmedia.com)
6. [www.toolsnz.com](http://www.toolsnz.com)
7. <http://content.answcdn.com/main/content/img/McGrawHill/Encyclopedia>
8. <http://ewh.ieee.org>
9. Alerich, W. N., Herman, S. L., (1985), Industrial Motor Control, Delmar Publisher Inc
10. Hughes, E. (1995), Electrical Technology, Longman Singapore Publisher



## Dasar Elektronika Daya

### 5.1 PENDAHULUAN

Elektro daya merupakan disiplin ilmu yang berada dalam rumpun teknik elektro. Disiplin ini menggabungkan beberapa disiplin ilmu lain, di antaranya

- Fisika semikonduktor
- Rangkaian listrik
- Kontrol
- Pemrosesan sinyal
- Elektronika
- Elektromagnet
- Sistem tenaga
- Mesin listrik

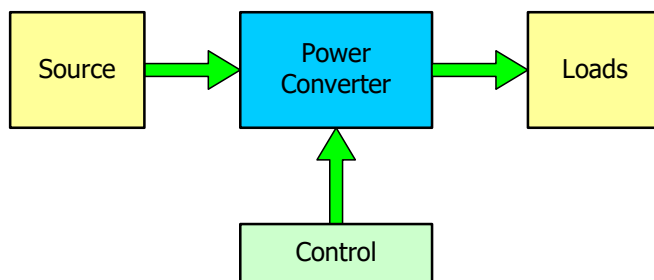
Fokus elektronika daya adalah tentang pengkonversian energi listrik dari satu bentuk ke bentuk lainnya (Gambar-1.1) dengan menggunakan komponen semikonduktor agar dicapai beberapa keuntungan, yaitu

- Efisiensi
- Keandalan
- Biaya dan ukuran

Dewasa ini elektronika daya berkembang sangat pesat karena adanya beberapa faktor, di antaranya

- Berkembangnya komponen semikonduktor
- Berkembangnya mikroelektronik (*DSP*, mikroprosesor, dll)
- Berkembangnya algoritma kontrol
- Bertambahnya permintaan/kebutuhan dalam aplikasi





Gambar -5.1. Prinsip dan fokus elektronika daya

## 5.2 KONVERTER

Dalam elektronika daya suatu komponen semikonduktor umumnya dioperasikan sebagai saklar statis untuk mengendalikan aliran daya pada konverter. Konverter statis ini merupakan piranti untuk konversi energi yang banyak diterapkan sebagai catu daya ataupun untuk keperluan sebagai penggerak listrik. Secara prinsip topologi dasar konverter statis (Gambar-1.2) ada tiga macam, yaitu

**Rectifier** (penyearah), yaitu suatu konverter statis yang mampu mengubah energi listrik dari masukan tegangan AC menjadi tegangan DC pada keluaran, penyearah ini dibedakan menjadi :

**Penyearah dioda** yang hanya menghasilkan tegangan DC yang relatif konstan (Gambar-5.3)

**Penyearah terkendali sudut fasa**, penyearah ini menggunakan thyristor yang dapat dikendalikan saat awal konduksinya untuk mengatur nilai tegangan DC keluarannya (Gambar-5.4)

**Penyearah berbasis MLP** (Modulasi Lebar Pulsa) yang menggunakan saklar statis berkecepatan tinggi untuk menghasilkan tegangan DC variabel dengan tetap menjaga tingkat distorsi arus masukan

**Chopper**, yaitu suatu konverter statis yang mampu mengubah energi listrik dari masukan tegangan DC konstan menjadi tegangan DC variabel pada keluaran, *chopper* sering disebut juga dengan DC converter dan dibedakan menjadi

**Step-down chopper** yang akan menghasilkan tegangan DC keluaran dengan *magnitude* lebih kecil dari tegangan DC masukan (Gambar-5.5)



**Step-up chopper** yang akan menghasilkan tegangan *DC* keluaran dengan *magnitude* lebih besar dari tegangan *DC* masukan (Gambar-5.6)

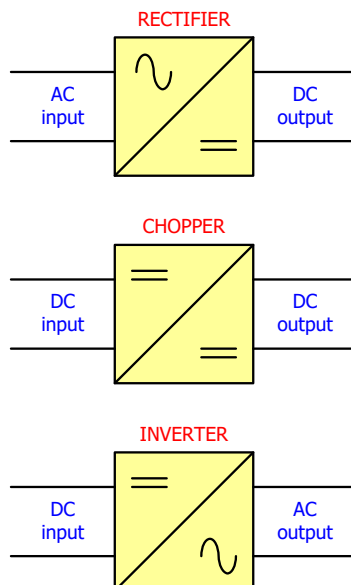
**Step-up/down chopper** yang akan menghasilkan tegangan *DC* keluaran dengan *magnitude* lebih besar/kecil dari tegangan *DC* masukan (Gambar-5.7)

**Inverter**, yaitu suatu konverter statis yang mampu mengubah energi listrik dari masukan tegangan *DC* menjadi tegangan *AC* pada keluaran (Gambar-1.8), inverter dibedakan menjadi

**Inverter gelombang persegi** yang akan menghasilkan gelombang *AC* dengan bentuk persegi (*square-waveform*), inverter jenis ini umumnya menggunakan saklar statis thyristor (Gambar-5.9)

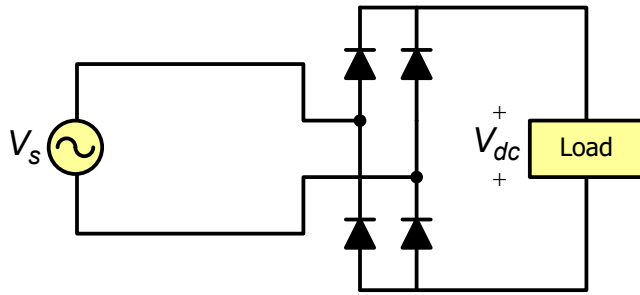
**Inverter gelombang sinusoidal** yang akan menghasilkan gelombang *AC* dengan bentuk persegi (*sinusoidal-waveform*), inverter jenis ini umumnya menggunakan saklar statis berkecepatan tinggi (Gambar-5.10)

**Inverter jenis multilevel** yang menggunakan tegangan keluaran yang tersusun dari beberapa level tegangan (Gambar-5.11)

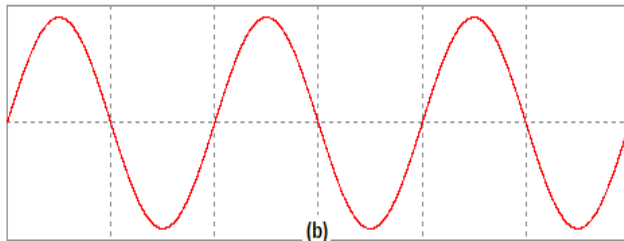


Gambar-5.2. Konverter dasar dalam disiplin elektronika daya

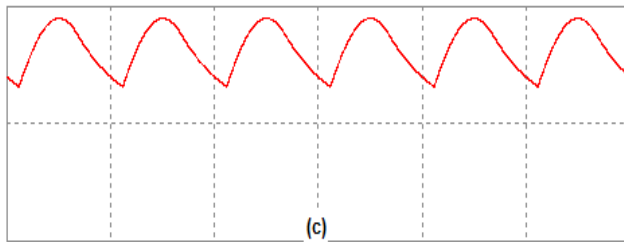




(a)



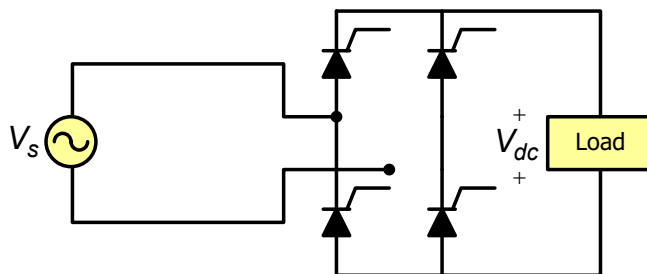
(b)



(c)

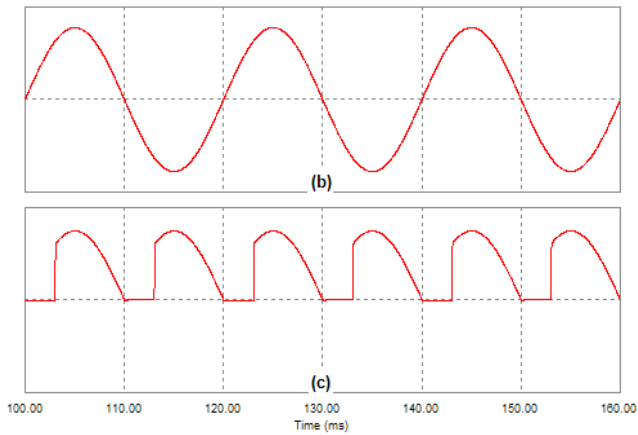
100.00 110.00 120.00 130.00 140.00 150.00 180.00  
Time (ms)

Gambar-5.3. Penyearah dioda (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan (c) tegangan keluaran

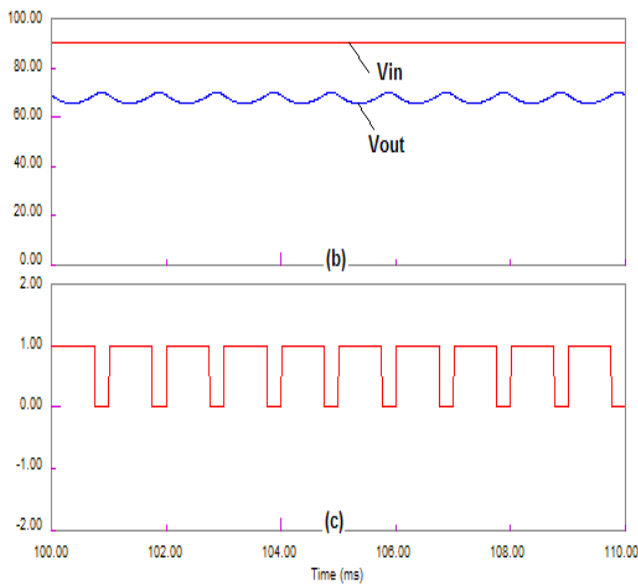
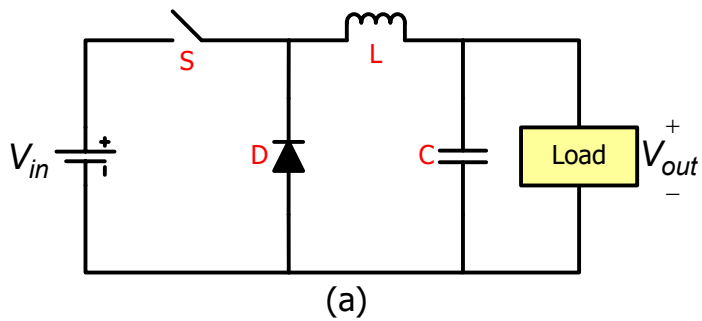


(a)



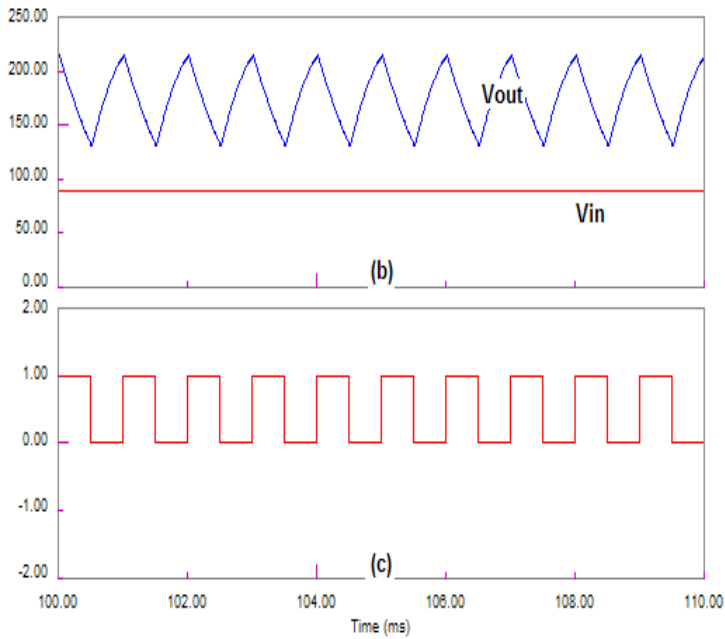
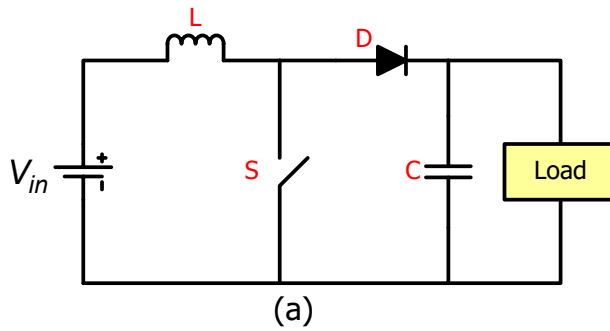


Gambar-5.4. Penyearah terkendali sudut fasa (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan (c) tegangan keluaran



Gambar-5.5. Chopper jenis step-down (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan dan tegangan keluaran (c) kendali untuk saklar

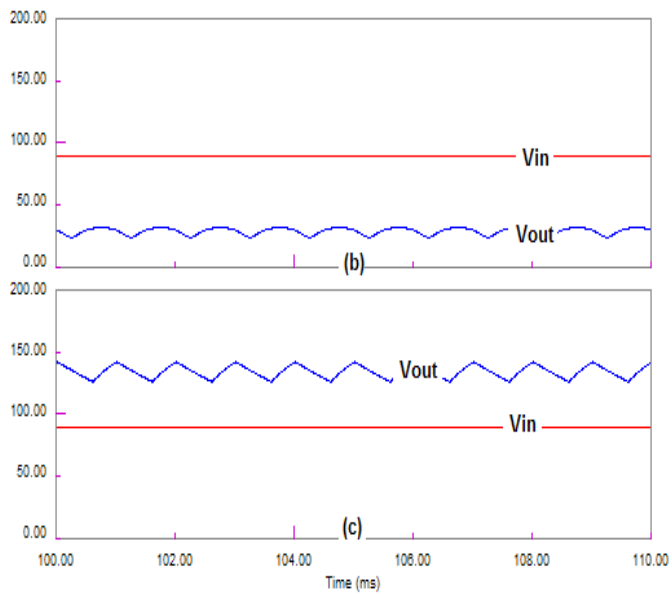
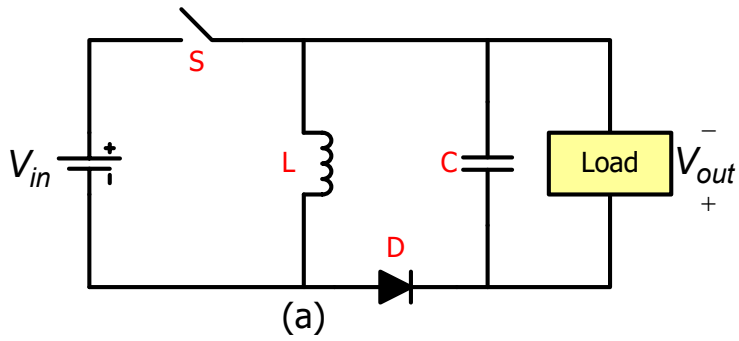




*Gambar-5.6. Chopper jenis step-up (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan dan tegangan keluaran (c) kendali untuk saklar*

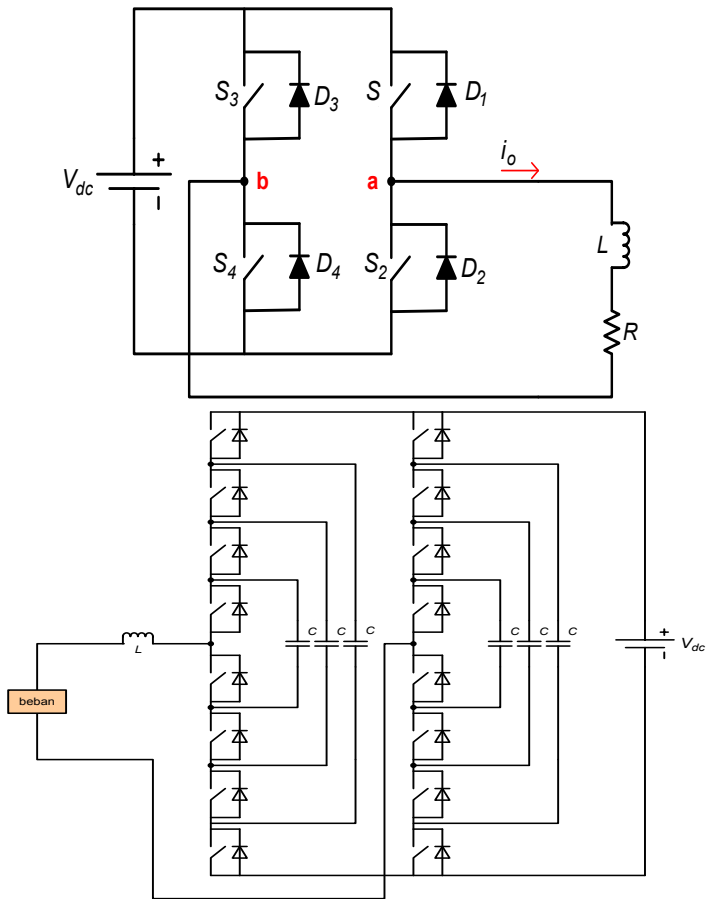




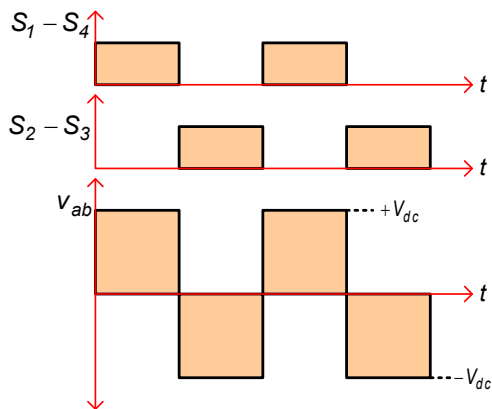


*Gambar-5.7. Chopper jenis step-up/down (a) skema rangkaian (b) tegangan masukan dan tegangan keluaran saat menurunkan tegangan (c) tegangan masukan dan tegangan keluaran saat menaikkan tegangan*



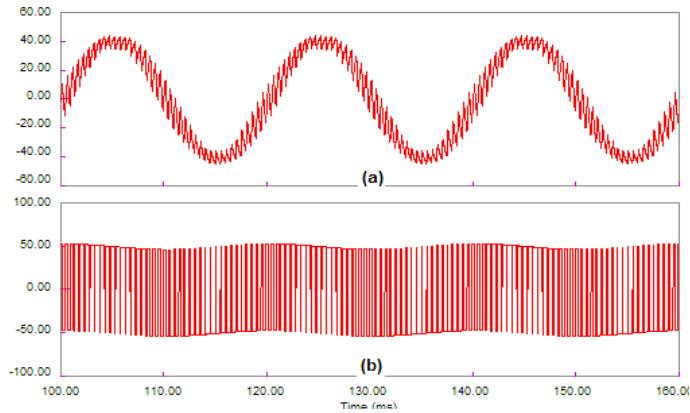


Gambar-5.8. Inverter (a) topologi standar (b) topologi multilevel

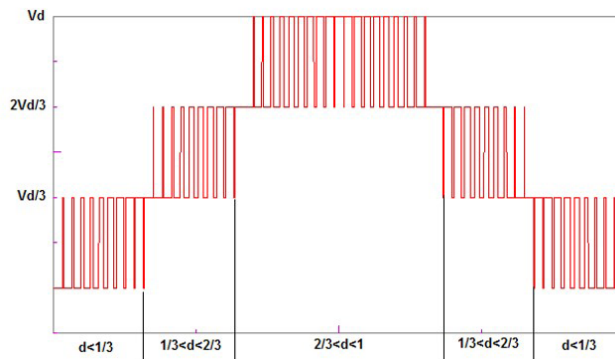


Gambar-5.9. Tegangan keluaran inverter gelombang persegi





Gambar-5.10. Tegangan keluaran inverter sinusoidal (a) setelah ditapis (b) sebelum ditapis



Gambar-5.11. Tegangan keluaran inverter jenis multilevel

### 5.3 SAKLAR STATIS

Dalam elektronika daya, komponen semikonduktor yang dioperasikan sebagai saklar statis memegang peranan yang sangat penting. Melalui implementasi saklar statis dalam konverter maka banyak penerapan dapat dilakukan. Saklar semikonduktor dapat diklasifikasikan menjadi

*Uncontrolled static switch*, Pada saklar jenis ini, kondisi *ON* dan *OFF* ditentukan oleh tegangan sistem (contoh : dioda)

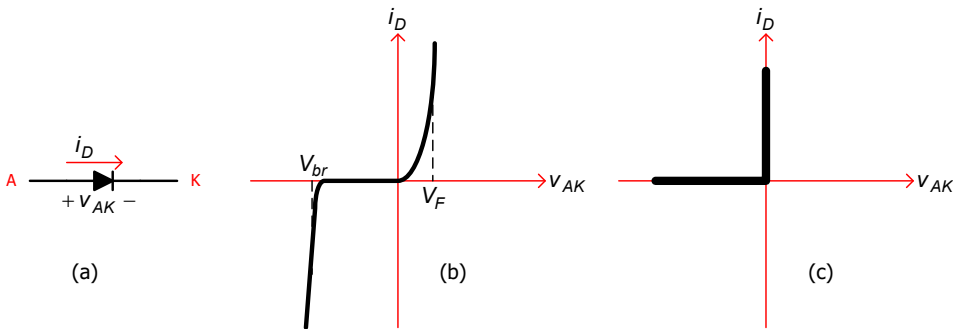
*Semi-controlled static switch*. Pada saklar jenis ini, kondisi *ON* dapat dikendalikan dan kondisi *OFF* ditentukan oleh tegangan sistem (contoh : SCR)

*Fully-controlled static switch*. Pada saklar jenis ini, kondisi *ON* dan *OFF* dapat dikendalikan (contoh : GTO, BJT, MOSFET dan IGBT)

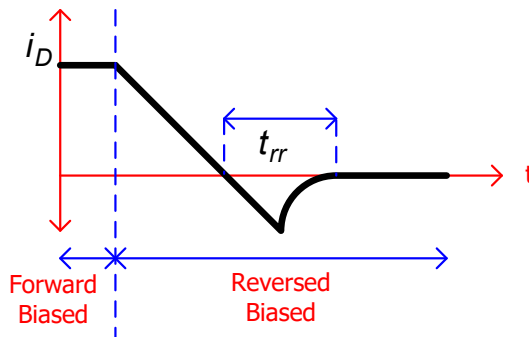


### 5.3.1 Dioda

Dioda merupakan komponen semikonduktor yang paling banyak dimanfaatkan. Dioda memiliki dua terminal, yaitu *Anoda* (A) dan *Katoda* (K). Jika dioda dibias maju ( $v_{AK} > 0$ ) maka arus dioda  $i_D$  akan mengalir dari *Anoda* menuju ke *Katoda* dan jatuh tegangan kecil akan timbul. Sedangkan jika dioda dibias mundur (*blocking state*) di bawah nilai *reversed breakdown voltage*  $V_{br}$  maka hanya arus bocor (diabaikan) yang akan mengalir. Dalam implementasi umumnya dioda dioperasikan di bawah nilai  $V_{br}$  (Gambar-5.12). Jika dioda yang awalnya berada pada kondisi dibias maju lalu dibias mundur maka arus akan tetap mengalir selama beberapa saat karena adanya *minority carriers* yang masih terdapat pada *p-n junction*. Interval waktu selama terjadinya aliran arus dinamakan *reverse recovery time*  $t_{rr}$  yang akan berdampak pada rugi-rugi pensaklaran dan terjadinya *spike* pada pembebanan induktif. Pada dioda jenis *general purpuse* nilai  $t_{rr}$  cukup besar (sekitar 25  $\mu s$ ) sedangkan pada dioda jenis *fast recovery* maka nilai  $t_{rr}$  cukup kecil (kurang dari 1  $\mu s$ ).



Gambar-5.12. Dioda (a) simbol (b) karakteristik i-v (c) karakteristik ideal

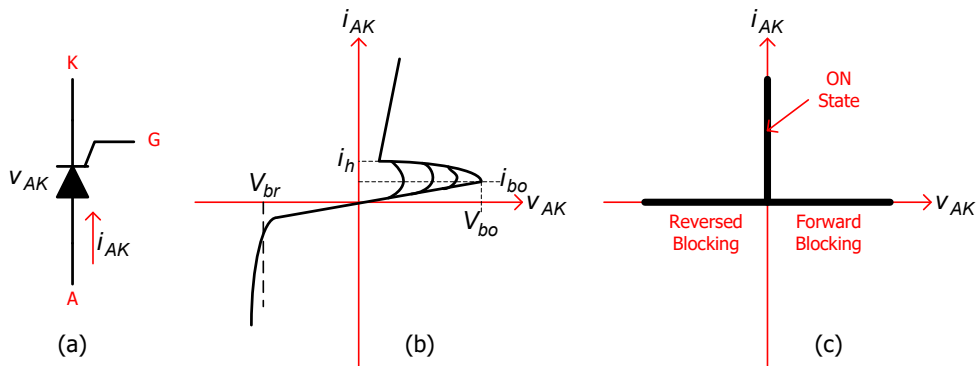


Gambar-5.13. Dioda saat turn-off



### 5.3.2 Thyristor

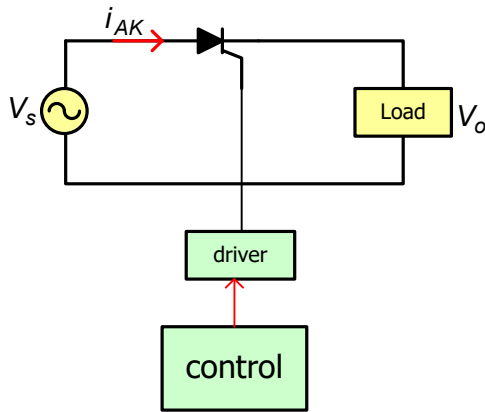
Thyristor memiliki tiga buah terminal, yaitu *Anoda* (A), *Katoda* (K) dan *Gate* (G) serta merupakan saklar jenis *semi-controlled* karena saat ON dari saklar ini dapat dikendalikan dengan mengalirkan arus pada terminal *Gate*-nya ( $i_G$ ). Tanpa adanya arus pada terminal *Gate* maka suatu thyristor dapat konduksi jika tegangan antara terminal *Anoda* dan *Katoda*  $V_{AK}$  melebihi nilai tegangan *break-over*  $V_{bo}$  dan menyalakan thyristor dengan cara demikian tidak dikehendaki. Adanya arus  $i_G$  akan menurunkan nilai  $V_{bo}$ . Pada kondisi normal jika tegangan  $V_{AK}$  maka dengan memberikan  $i_G$  suatu thyristor akan berada pada kondisi konduksi. Pemberian arus  $i_G$  negatif tidak akan mematikan thyristor. Untuk mematikan suatu thyristor maka arus thyristor  $i_{AK}$  harus berada di bawah nilai arus *holding* ( $i_h$ ).



Gambar-5.14. Thyristor (a) simbol (b) karakteristik  $i-v$  (c) karakteristik ideal

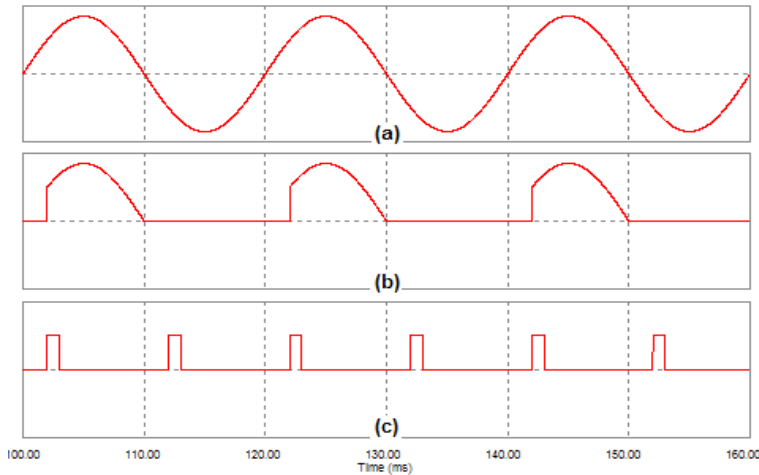
Pada Gambar-5.15 disajikan skema implementasi thyristor pada penyearah terkendali sudut fasa jenis *half-bridge*. Arus  $i_G$  akan diberikan ke thyristor saat tegangan fasa berada pada setengah siklus positif dan setengah siklus negatif. Pemberian arus  $i_G$  ke thyristor saat tegangan fasa positif akan mengakibatkan thyristor berada pada kondisi konduksi sedangkan pemberian arus  $i_G$  ke thyristor saat tegangan fasa negatif maka tidak akan menyalakan thyristor (Gambar-5.16).





Gambar-5.15. Implementasi thyristor pada penyearah terkendali sudut fasa jenis half-bridge

Untuk mematikan suatu thyristor pada tegangan sumber AC tidak akan mengalami kesulitan karena arus thyristor akan menjadi nol dengan turunnya gelombang tegangan sumber (komutasi *natural*) tetapi untuk aplikasi pada tegangan sumber DC (misalkan implementasi pada *chopper*) cara mematikan suatu thyristor akan mengalami kendala. Untuk itu diperlukan rangkaian tambahan guna memaksa arus thyristor berada di bawah nilai  $i_h$  (komutasi paksa).

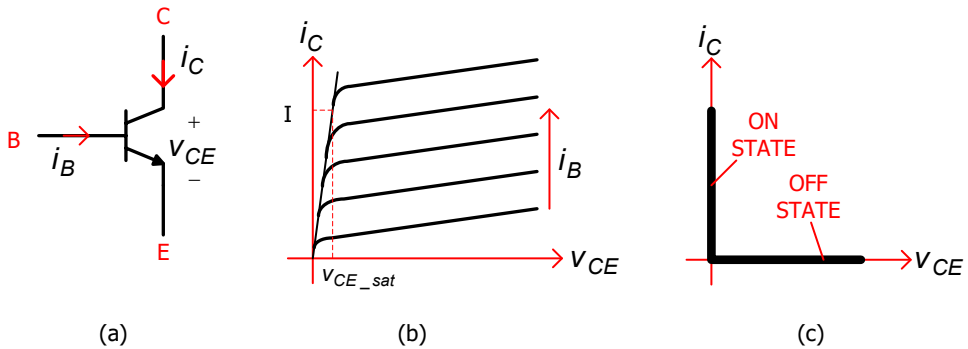


Gambar-5.16. Gelombang pada penyearah terkendali sudut fasa jenis half-bridge (a) tegangan sumber (b) arus thyristor (c) arus gate



### 5.3.3 Bipolar Junction Transistor (BJT)

Suatu *BJT* termasuk jenis saklar statis yang dapat dikendalikan saat *ON* dan *OFF*-nya, komponen ini memiliki tiga buah terminal, yaitu *Collector* (C), *Emitter* (E) dan *Base* (B). Dalam ukuran daya, suatu *BJT* memiliki rating tegangan dan rating arus yang cukup besar (sekitar 1000 V dan 400 A). Kemampuan melakukan pensaklaran dari suatu *BJT* adalah hingga 5 kHz. Saklar statis jenis ini juga memiliki jatuh tegangan saat konduksi pada terminal C-E ( $V_{CE\_sat}$ ) yang cukup kecil (sekitar 2-3 V). Kelemahan dari suatu *BJT* ukuran daya adalah memiliki nilai *current gain*  $\beta$  yang cukup kecil sehingga untuk mengalirkan arus kolektor  $I_C$  yang besar memerlukan arus base  $I_B$  yang cukup besar pula, selain itu memerlukan rangkaian *driver* yang rumit.

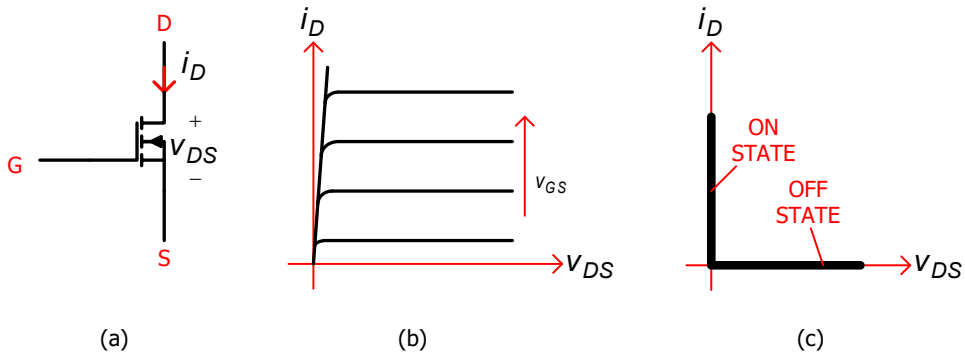


Gambar-5.17. Bipolar Junction Transistor (a) simbol (b) karakteristik *i-v* (c) karakteristik ideal

### 5.3.4 Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor (MOSFET)

Jika *BJT* merupakan piranti yang dikendalikan melalui arus base-nya maka *MOSFET* merupakan keluarga transistor yang dapat dikendalikan melalui tegangan gate-nya. *MOSFET* memiliki kemampuan pensaklaran di atas *BJT* (sekitar 100 kHz) bahkan untuk yang ukuran kecil mampu melakukan pensaklaran hingga orde MHz. *MOSFET* daya memiliki rating tegangan cukup tinggi (500-600 V) tetapi dengan rating arus lebih kecil dibanding *BJT*. Terminal yang ada pada *MOSFET* adalah *Gate* (G), *Source* (S) dan *Drain* (D). Adanya tahanan antara terminal Drain dan Source  $R_{DS}$  akan membatasi operasi suatu *MOSFET*. Umumnya untuk menghidupkan suatu *MOSFET* dapat dilakukan dengan memberi tegangan sebesar 15 V ke terminal G-S dan untuk mematikan dengan memberinya tegangan 0 V.



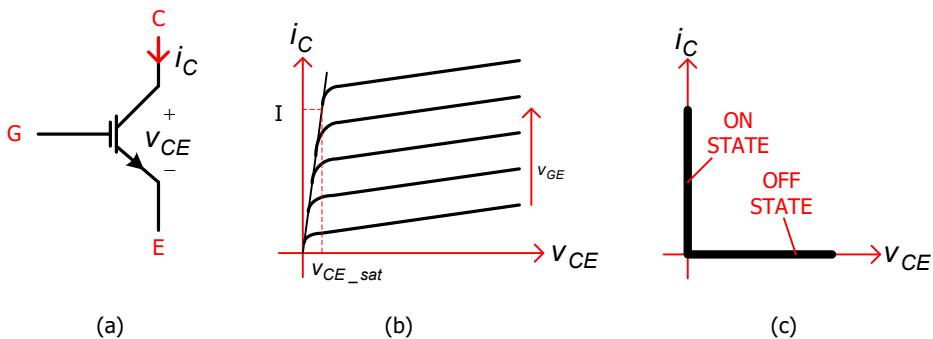


Gambar-5.18. MOSFET (a) simbol (b) karakteristik  $i$ - $v$  (c) karakteristik ideal

### 5.3.5 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Komponen semikonduktor *IGBT* memiliki tiga buah terminal, yaitu Gate (G), *Collector* (C), dan *Emitter* (E). Saklar statis ini mampu dikendalikan ON dan OFF-nya dengan memberikan tegangan antara terminal G-E. *IGBT* merupakan perpaduan antara *MOSFET* pada sisi masukannya (terminal G-E) dan *BJT* sebagai sisi keluarannya (terminal C-E). *IGBT* tersedia sebagai saklar daya yang memiliki kemampuan pensaklaran hingga 100 kHz dengan rating tegangan sekitar 4,5 kV dan arus sekitar 1,2 kA.

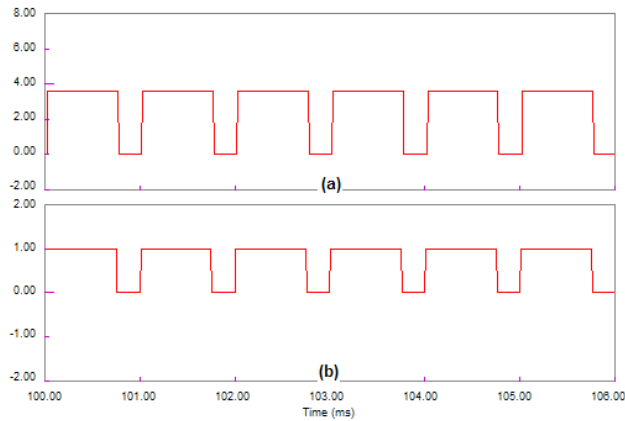
Jenis saklar statis yang mampu dikendalikan saat ON dan OFF-nya memerlukan pulsa dengan lebar tertentu untuk menghasilkan arus. Pada Gambar-1.20 ditunjukkan suatu pola bagaimana saklar statis jenis tersebut bekerja. Suatu *BJT* memerlukan arus pada terminal *Base*-nya sedangkan *MOSFET* memerlukan tegangan pada terminal *Gate-Source* dan *IGBT* pada terminal *Gate-Emitter*.



Gambar-5.19. IGBT (a) simbol (b) karakteristik  $i$ - $v$  (c) karakteristik ideal







Gambar-5.20. (a) arus pada sisi keluaran saklar statis jenis fully-controlled (b) pulsa kendali

## 5.4 LATIHAN

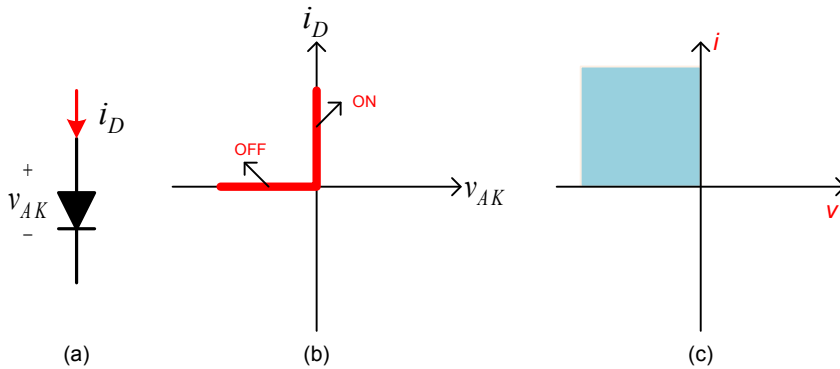
### Latihan-1

Tentukan kuadran operasi dari saklar statis dioda ?

Jawab

Suatu saklar statis yang diimplementasikan dengan suatu dioda dapat dianggap sebagai suatu saklar yang beroperasi pada satu kuadran. Mengacu pada kurva V-I maka dapat dikatakan suatu dioda selalu memiliki arus yang bernilai positif atau nol ( $i_D \geq 0$ ) karena pada kondisi normal arus dioda hanya mengalir pada satu arah atau tidak dapat mengalir dengan arah terbalik. Sedangkan tegangan pada terminal Anoda-Katoda selalu negatif atau nol ( $v_D \leq 0$ ), jika diberikan tegangan maju maka tegangan dioda sama dengan nol tetapi jika diberikan tegangan balik maka nilai tegangan dioda akan negatif. Dengan demikian maka dioda sebagai saklar akan memiliki daerah operasi satu kuadran yang terletak pada kuadran II





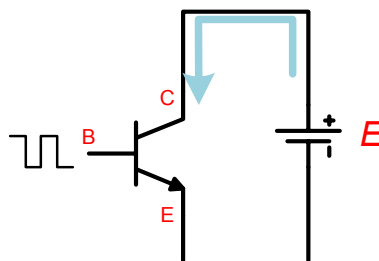
Gambar-5.21. Dioda (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi

### Latihan-2

Tentukan kuadran operasi dari saklar statis BJT ?

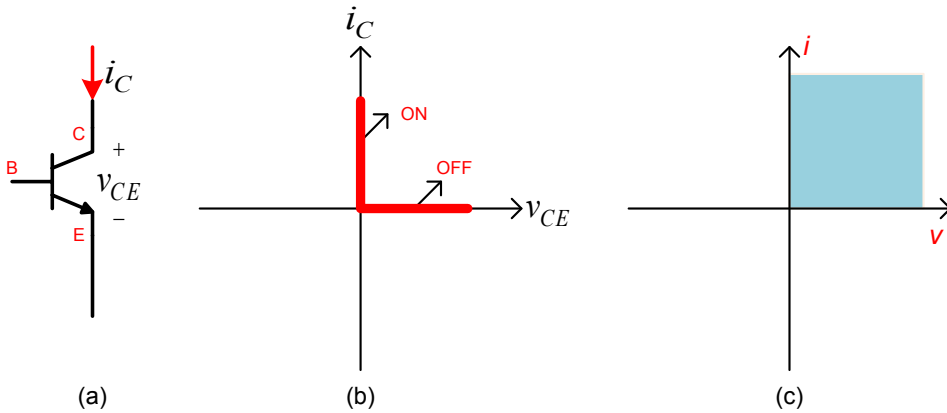
Jawab

Dalam elektronika daya juga dikenal saklar statis yang dapat dikendalikan ON/OFF-nya, saklar seperti ini mencakup Bipolar Junction Transistor (BJT), IGBT dan lain-lain. Pada Gambar-1.22 ditampilkan suatu saklar statis yang diimplementasikan dengan BJT jenis NPN. Transistor jenis ini akan mengalirkan arus dari terminal Collector menuju ke Emitor jika pada terminal Basis diberikan arus sehingga saklar jenis ini hanya mampu mengalirkan arus dalam satu arah. Pemberian tegangan pada transistor jenis ini harus memiliki polaritas agar arus mengalir menuju Emitor. Dengan demikian maka jika suatu transistor pada kondisi ON akan memiliki arus yang positif dan tegangan sama dengan sedangkan saat OFF arusnya sama dengan nol dan tegangan terminal C-E akan positif. Pada Gambar-1.23 digambarkan kuadran operasi saklar transistor berada pada kuadran I yang memiliki tegangan maupun arus positif.



Gambar-5.22. Pemberian tegangan pada Bipolar Junction Transistor





Gambar-5.23. Bipolar Junction Transistor (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi

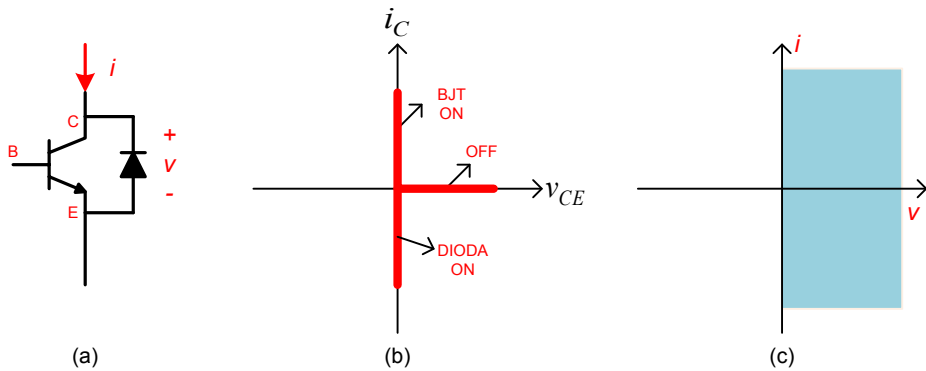
### Latihan-3

Bagaimana menghasilkan saklar statis yang mampu bekerja pada kuadran I dan IV ?

Jawab

Penggabungan dua buah saklar statis sering dilakukan untuk tujuan tertentu, misalkan koneksi anti-paralel antara BJT dengan dioda seperti ditunjukkan pada Gambar-1.24. Pada gambar tersebut saklar akan difungsikan untuk beroperasi pada dua kuadran (kuadran I dan IV). Operasi pada kedua kuadran ini membutuhkan saklar yang mampu mengalirkan arus dua arah (*bidirectional current*) dan mampu menahan tegangan positif. Arah arus dari atas ke bawah akan dialirkan melalui BJT (setelah terminal Basis mendapat arus) sedangkan arus dengan arah sebaliknya akan dialirkan melalui dioda. Jika tegangan yang diberikan memiliki polaritas positif bagian bawah maka akan dialirkan melalui dioda sedangkan tegangan dengan polaritas positif di sebelah atas maka akan dapat ditahan (selama arus Basis belum diberikan).





Gambar-5.24. Koneksi anti-paralel antara Bipolar Junction Transistor dan dioda (a) simbol (b) kurva karakteristik (c) kuadran operasi

## DAFTAR PUSTAKA

1. Sen, P., C., (1993), *Power Electronics*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi
2. William, B., W., (1992), *Power Electronics : Devices, Drivers, Applications and Passive Components*, ELBS, British
3. Mohan, N., Undeland, T., M., Robbins, W., P., (1994), *Power Electronics : Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons
4. Rashid, M. H. (1993) : *Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications*, Prentice Hall International Inc



## Penyearah Dioda Satu Fasa

### 6.1 PENDAHULUAN

Penyearah merupakan suatu piranti yang mampu mengubah besaran listrik AC (bolak-balik) pada sisi masukan menjadi besaran DC (searah) pada sisi keluaran. Secara historis suatu penyearah dapat diimplementasikan melalui konverter berputar (*rotary converter*), penyearah tabung dan penyearah semikonduktor. Penyearah diperlukan dalam berbagai sektor untuk memberi catu kepada peralatan yang memerlukan tegangan/ arus DC, di antaranya :

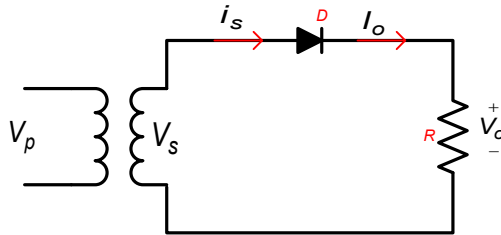
- pengisi batere
- motor DC
- kopling magnet
- proses elektro kimia
- dan lain-lain

Penyearah dioda merupakan topologi penyearah yang sangat sederhana dapat banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi. Topologi penyearah ini mengimplementasikan komponen semikonduktor dioda sebagai penyearah yang akan mengubah gelombang masukan AC (bolak-balik) menjadi gelombang keluaran berupa besaran DC (searah). Penyearah dioda dibuat mulai dari *rating* kecil dengan masukan tegangan AC satu fasa hingga *rating* besar yang memerlukan tegangan sistem tiga fasa. Pada bab ini akan dipaparkan penyearah dioda satu fasa dengan pembebanan resistif, induktif dan kapasitif yang diimplementasikan pada kondisi ideal maupun dengan memperhatikan beberapa parameter sistem

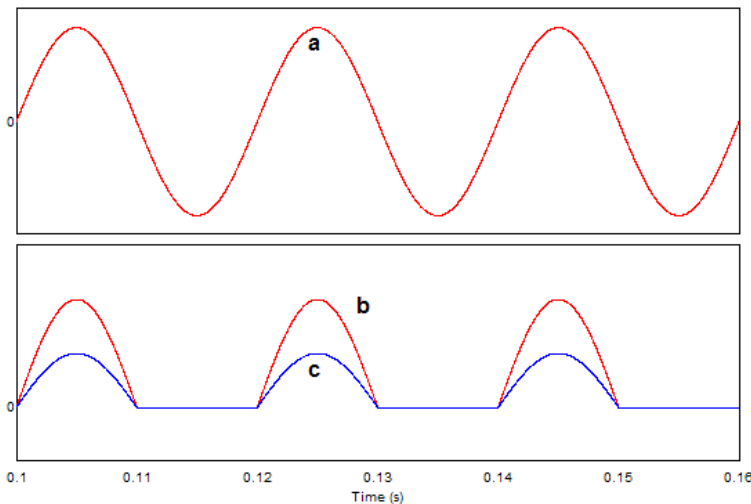


## 6.2 PENYEARAH DIODA SATU FASA SETENGAH GELOMBANG

Pada Gambar-6.1 ditunjukkan skema penyearah dengan implementasi dioda satu fasa setengah gelombang (*half-wave*) yang dibebani dengan beban resistif. Tegangan sumber untuk penyearah diperoleh melalui suatu *transformator*. Dengan mengingat bahwa komponen semikonduktor dioda dalam kondisi ideal akan berfungsi sebagai saklar maka saat tegangan terminal *Anoda* (A) lebih positif dari terminal *Katoda* (K), dioda akan konduksi dan akan tidak konduksi pada kondisi sebaliknya. Pada Gambar-6.2 dan Gambar-6.3 disajikan gelombang tegangan dan arus dari penyearah tersebut. Arus dioda hanya akan mengalir saat setengah siklus positif tegangan sumber. Pada kondisi ini tegangan keluaran akan sama dengan tegangan sumber dan tegangan pada dioda sama dengan nol. Tetapi saat setengah siklus negatif, arus dioda tidak dapat mengalir sehingga tegangan keluaran sama dengan nol dan tegangan pada dioda sama dengan tegangan sumber.



Gambar-6.1 Penyearah dioda satu fasa setengah gelombang melalui transformator



Gambar-6.2 Gelombang pada penyearah dioda satu fasa setengah gelombang (a) tegangan sumber (b) tegangan keluaran (c) arus keluaran



Untuk memudahkan kajian sebagai pemahaman dasar maka diambil beberapa asumsi, di antaranya dioda dianggap ideal dan impedansi sumber diabaikan. Jika tegangan AC pada sisi sekunder *transformator* adalah

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (6-1)$$

Maka selama setengah siklus positif tegangan sumber

$$0 \leq \omega t \leq \pi \rightarrow v_o(t) = v_s(t) \text{ dan } v_d(t) = 0$$

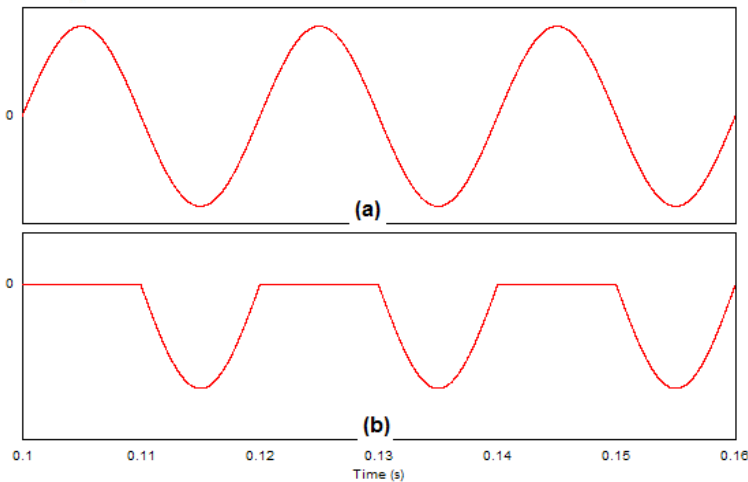
dan selama setengah siklus negatif tegangan sumber

$$\pi \leq \omega t \leq 2\pi \rightarrow v_o(t) = 0 \text{ dan } v_d(t) = v_s(t)$$

Nilai rata-rata dari tegangan keluaran dapat dinyatakan

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 d(\omega t) \right] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (6-2)$$

$$= \frac{V_m}{\pi} = 0,318V_m = 0,45V$$



**Gambar-6.3** Gelombang pada penyearah dioda satu fasa setengah gelombang (a) tegangan sumber (b) tegangan pada dioda

Sedangkan nilai efektif (RMS) dari tegangan keluaran ditentukan dengan persamaan

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (6-3)$$

$$= \frac{V_m}{2} = \frac{V}{\sqrt{2}} = 0,707V$$



Dengan mengacu pada kedua persamaan di atas maka *Form Factor (FF)* yang didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai efektif tegangan keluaran terhadap nilai rata-rata tegangan keluaran dapat ditentukan sebagai berikut

$$FF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{0,707 V}{0,45 V} = 1,57 \quad (6-4)$$

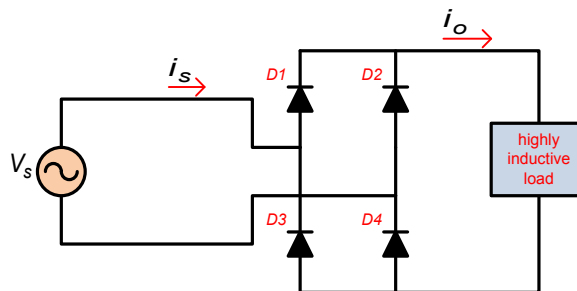
Nilai *Ripple Factor (RF)* yang merupakan perbandingan nilai *RMS* dari komponen *AC* tegangan keluaran terhadap nilai *DC* tegangan keluaran diperoleh

$$RF = \frac{\left[ V_{ac}^2 - V_{dc}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{V_{dc}} = \frac{\left[ (0,707 V)^2 - (0,45 V)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{0,45 V} = 1,21 \quad (6-5)$$

Penyearah setengah gelombang memiliki nilai nilai *RF* yang tinggi sehingga jarang digunakan dalam aplikasi

### 6.3 PENYEARAH DIODA GELOMBANG PENUH TIPE FULL BRIDGE

Suatu sistem yang digunakan dioda untuk mencatu tegangan *AC* selalu memiliki impedansi sumber. Parameter ini sangat mempengaruhi gelombang tegangan dan arus terkait dengan operasi penyearah dioda. Pada Gambar-6.4 disajikan penyearah dioda tipe *full-bridge* dihubungkan dengan beban yang sangat induktif. Pada sisi masukan digunakan tegangan sumber yang diabaikan impedansinya ( $Z_L = 0$ ).



Gambar-6.4 Penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber)

Adanya beban yang sangat induktif menyebabkan arus keluaran relatif konstan. Dikarenakan tidak adanya impedansi sumber maka arus sisi sumber dapat berubah secara sesaat. Dengan mengingat setiap kelompok dioda akan konduksi pada setengah siklus tegangan sumber maka arus masukan akan merupakan gelombang persegi dengan amplituda sama dengan arus keluaran (Gambar-6.5). Tegangan keluaran penyearah merupakan nilai mutlak (*absolute*) dari tegangan masukan. Pada setengah siklus positif tegangan

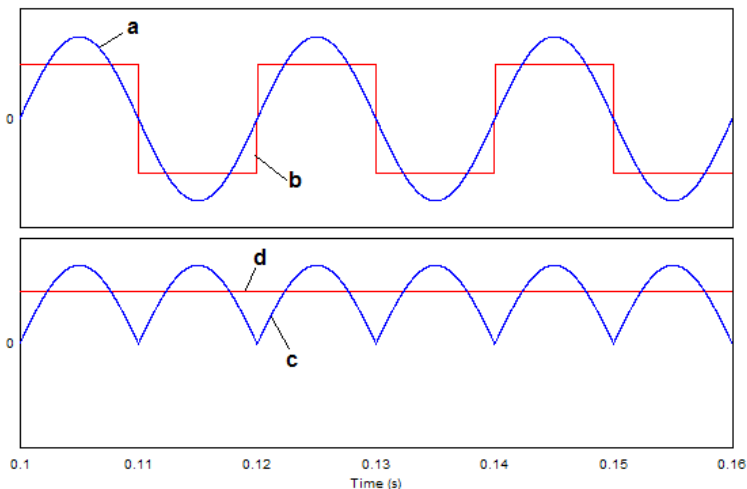




sumber arus akan mengalir melalui  $D_1 - D_4$  sedangkan saat setengah siklus negatif tegangan sumber arus akan mengalir melalui  $D_2 - D_3$  .

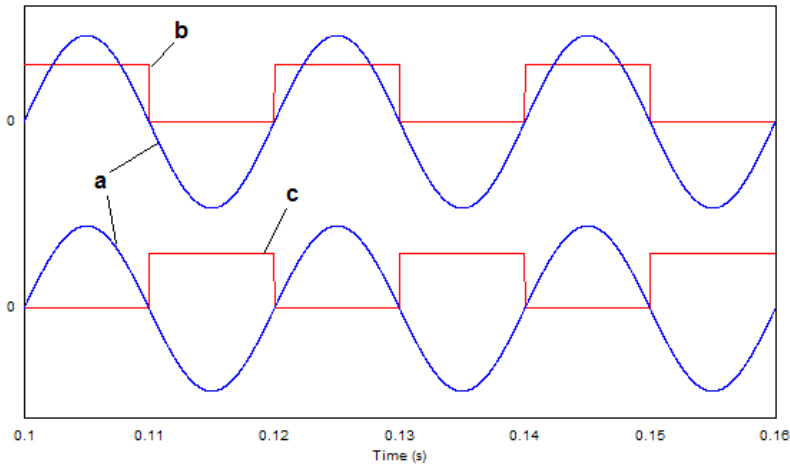
Suatu penyearah dioda satu fasa tipe *full-bridge* yang dihubungkan dengan beban sangat induktif akan menyebabkan arus keluaran dengan nilai yang relatif konstan sehingga sisi keluaran penyearah dapat digantikan dengan suatu sumber arus konstan (Gambar-6.7). Dengan memasukkan impedansi sumber ( $Z_L \neq 0$ ) maka akan terjadi perubahan perilaku arus pada sisi sumber. Dengan mengambil pertimbangan bahwa adanya impedansi sumber akan mengakibatkan arus sisi sumber tidak dapat berubah secara sesaat maka akan terjadi kondisi di mana sebagian arus beban bersirkulasi melalui kelompok dioda lainnya.

Pada Gambar-6.7 terdapat dua kelompok dioda, yaitu kelompok  $D_1 - D_4$  yang akan konduksi selama setengah siklus positif tegangan sumber dan kelompok  $D_2 - D_3$  yang akan konduksi selama setengah siklus negatif tegangan sumber. Pada penyearah yang terhubung ke tegangan sumber dengan  $Z_L = 0$  maka kedua kelompok dioda akan selalu konduksi saling komplementer. Tetapi dengan kondisi di mana sumber  $Z_L \neq 0$  maka terdapat interval waktu di mana kedua kelompok akan konduksi secara bersamaan. Untuk memahami perilaku penyearah dioda pada kondisi demikian maka pada Gambar-6.8 disajikan gelombang tegangan sumber dan arus kelompok dioda pada pembebanan sangat induktif.

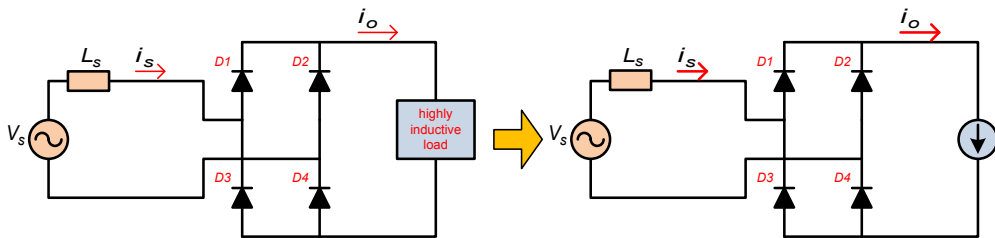


**Gambar-6.5** Gelombang pada penyearah dioda *full-bridge* dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber) (a) tegangan sumber (b) arus sumber (c) tegangan keluaran (d) arus keluaran





Gambar-6.6 Gelombang pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (tanpa memperhatikan impedansi sumber) (a) tegangan sumber (b) arus dioda D1 dan D4 (c) arus dioda D2 dan D3



Gambar-6.7 Penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif dan rangkaian ekuivalennya

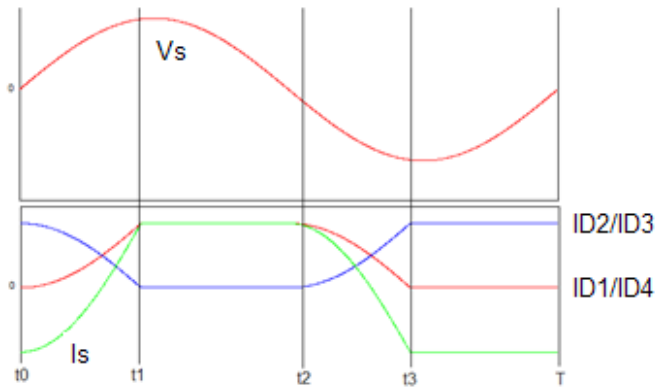
Kajian awal akan diambil pada saat di mana hanya kelompok  $D_1 - D_4$  yang konduksi selama interval  $t_1 \leq t \leq t_2$  (Gambar-6.9). Pada interval ini beberapa persamaan dapat diturunkan

$$i_{D1} = i_{D4} = i_o \quad \text{dan} \quad i_{D2} = i_{D3} = 0 \quad (6-6)$$

$$i_s = i_o \quad \text{dan} \quad v_o = |v_s| \quad (6-7)$$

Interval waktu pada mode operasi ini berakhir saat tegangan sumber menjadi negatif (berubah polaritas dari positif ke negatif).



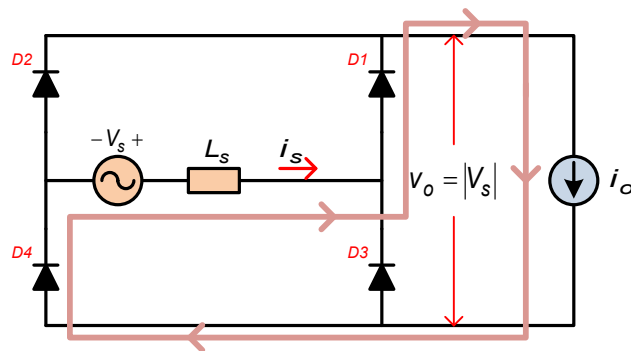


Gambar-6.8 Tegangan sumber dan arus dioda pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif

Pada saat tegangan sumber mulai negatif maka polaritas tegangan ini akan berusaha melawan arus sumber yang sedang mengalir sehingga arus sumber akan berkurang secara *magnitude*. Polaritas tegangan sumber yang demikian akan menyebabkan kelompok dioda  $D_2 - D_3$  dibias maju (*forward biased*) dan rangkaian ekuivalen untuk mode operasi ini dapat dilihat pada Gambar-6.10. Karena arus keluaran  $I_o$  dianggap relatif konstan sedangkan arus sumber menurun maka selisih antara arus beban dan arus sumber ( $I_o - i_s$ ). Karena kedua kelompok dioda konduksi secara bersamaan maka tegangan keluaran sama dengan nol. Persamaan yang dapat diturunkan pada mode operasi ini adalah

$$i_{D1} = i_{D4} = I_o - i_x \quad \text{dan} \quad i_{D2} = i_{D3} = i_x \quad (6-8)$$

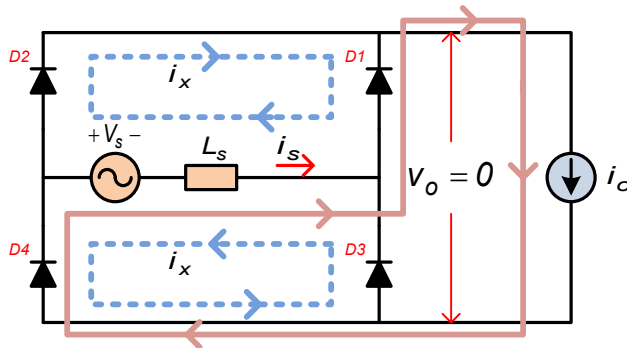
$$i_s = I_o - 2i_x \quad \text{dan} \quad v_o = 0 \quad (6-9)$$



Gambar-6.9 Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval  $t_1 \leq t \leq t_2$

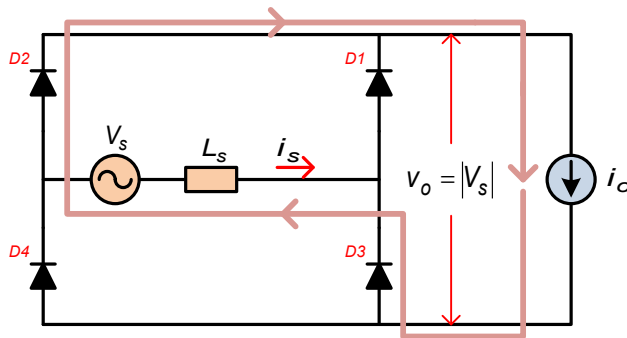


Mode operasi ini berlangsung selama  $t_2 \leq t \leq t_3$  dan berakhir pada saat arus yang melalui kelompok dioda  $D_1 - D_4$  sama dengan nol.



Gambar-6.10 Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval  $t_2 \leq t \leq t_3$

Mode operasi selanjutnya ( $t_3 \leq t \leq T$ ) berlangsung dengan kelompok dioda  $D_2 - D_3$  yang konduksi dan kelompok  $D_1 - D_4$  tidak konduksi (Gambar-6.11). Interval ini terjadi hingga tegangan sumber berubah polaritas dari negatif menjadi positif dan arus yang melalui dioda  $D_2 - D_3$  mulai turun. Pada saat yang bersamaan arus dioda  $D_1 - D_4$  akan naik karena sirkulasi arus keluaran.



Gambar-6.11 Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval  $t_3 \leq t \leq T$

Persamaan yang dapat diturunkan pada kondisi ini adalah

$$i_{D1} = i_{D4} = 0 \quad \text{dan} \quad i_{D2} = i_{D3} = I_o \quad (6-10)$$

$$i_s = -I_o \quad \text{dan} \quad v_o = |v_s| \quad (6-11)$$

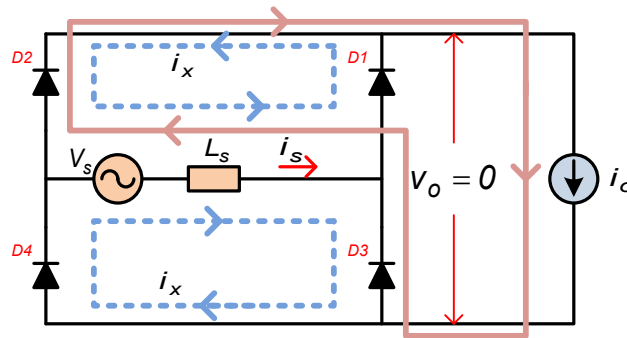
Arus  $D_2 - D_3$  akan menurun hingga sama dengan nol dan arus dioda  $D_1 - D_4$  naik hingga sama  $I_o$  dengan selama interval  $t_0 \leq t \leq t_1$  (Gambar-6.20). Selama interval ini didapatkan persamaan



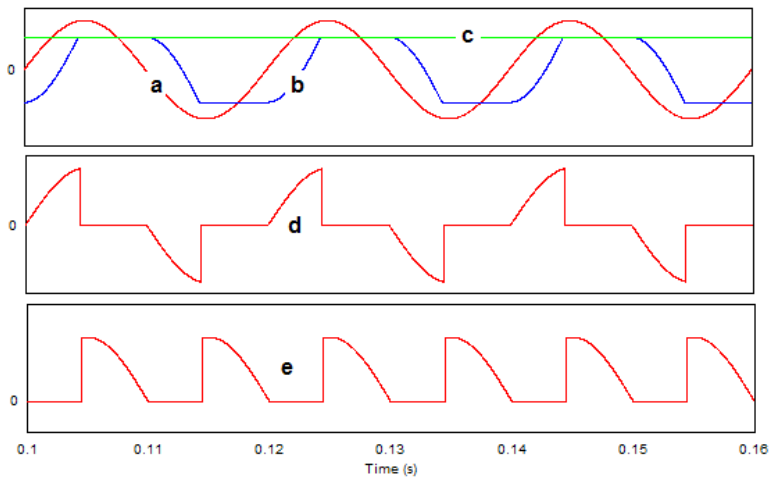
$$i_{D1} = i_{D4} = i_x \quad \text{dan} \quad i_{D2} = i_{D3} = I_o - i_x \quad (6-12)$$

$$i_s = -I_o + 2i_x \quad \text{dan} \quad v_o = 0 \quad (6-13)$$

Secara lengkap gelombang tegangan dan arus penyearah dioda disajikan pada Gambar-6.11.



**Gambar-6.12** Rangkaian ekuivalen penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif pada interval  $t_0 \leq t \leq t_1$



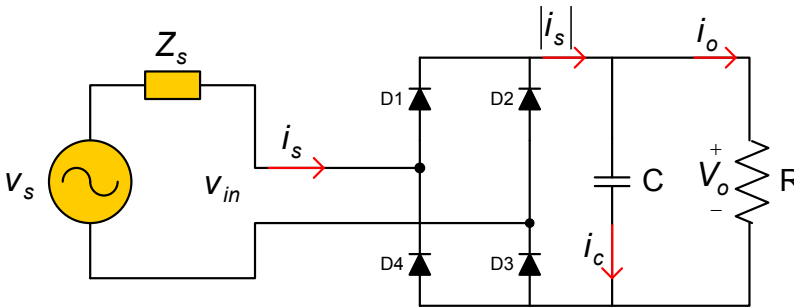
**Gambar-6.13** Gelombang tegangan dan arus pada penyearah dioda full-bridge dengan beban sangat induktif (a) tegangan sumber (b) arus sumber (c) arus keluaran (d) tegangan induktor (e) tegangan keluaran

Peralatan berbasis elektronik dewasa ini sangat mendominasi aplikasi pemanfaatan energi listrik khususnya dalam sektor perkantoran, rumah tangga dan industri. Tersedianya tegangan AC oleh penyedia energi listrik (PLN) menyebabkan diperlukannya penyearah karena semua peralatan elektronik memerlukan catu daya berupa tegangan DC. Penyearah dengan implementasi komponen semikonduktor berupa dioda sangat luas

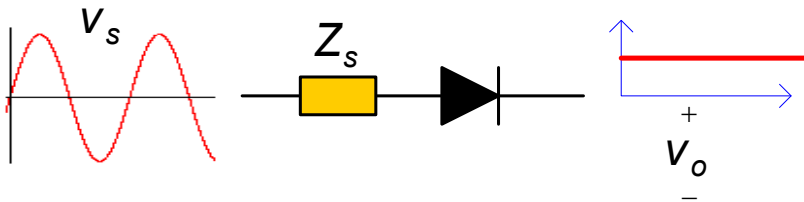


penggunaannya karena sederhana dan murah. Untuk aplikasi ini umumnya penyearah dioda yang digunakan adalah jenis jembatan penuh (*full bridge rectifier*). Untuk memberikan tegangan keluaran yang lebih baik maka dipakai tapis berupa kapasitor yang dipasang pada sisi keluaran dari penyearah ini (Gambar-6.14). Karena kapasitor merupakan elemen penyimpan energi yang mampu menyimpan energi listrik dalam bentuk medan listrik maka tegangan kapasitor akan cenderung relatif konstan. Di sisi lain, suatu penyearah dioda memiliki tegangan masukan AC berupa gelombang sinusoidal.

Suatu penyearah selalu memiliki tegangan keluaran rata-rata yang lebih kecil dari nilai puncak tegangan sumber sehingga pemasangan kapasitor pada sisi keluaran menyebabkan kondisi di mana suatu saat tegangan kapasitor lebih kecil dari tegangan sumber dan di saat lain tegangan kapasitor lebih besar dari tegangan sumber. Jika dilihat dari konfigurasi rangkaian maka suatu penyearah dapat dianggap sebagai suatu dioda dengan sisi masukan tegangan sumber sinusoidal dan tegangan keluaran berupa tegangan DC (Gambar-6.15). Suatu dioda akan menghantarkan arus jika dalam kondisi *forward biased* dan tidak akan menghantarkan arus pada kondisi *reversed biased*. Kondisi demikian menyebabkan arus yang mengalir pada sisi sumber hanya mengalir selama beberapa saat saat tegangan sumber  $v_s(t)$  melebihi nilai rata-rata tegangan keluaran  $V_o$ .



Gambar-6.14 Penyearah dioda dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran



Gambar-6.15 Penyederhanaan penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran



Pada Gambar-6.16 disajikan hasil simulasi dari penyearah dioda seperti tampak pada Gambar-6.14 yang dilengkapi dengan tapis kapasitor sebesar 10.000 uF dan beban resistor 5 Ohm. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa arus sisi sumber hanya mengalir pada saat tegangan sumber melebihi nilai tegangan keluaran. Kondisi ini menyebabkan bentuk gelombang arus tidak lagi sama dengan bentuk gelombang tegangan. Dengan demikian beban penyearah seperti ini menyebabkan hubungan tegangan dan arus menjadi tidak linier.

Untuk memahami lebih detail bagaimana operasi penyearah ini maka di bawah ini dipaparkan kajiannya. Mengacu pada gambar tersebut dapat diturunkan tiga macam mode operasi, yaitu :

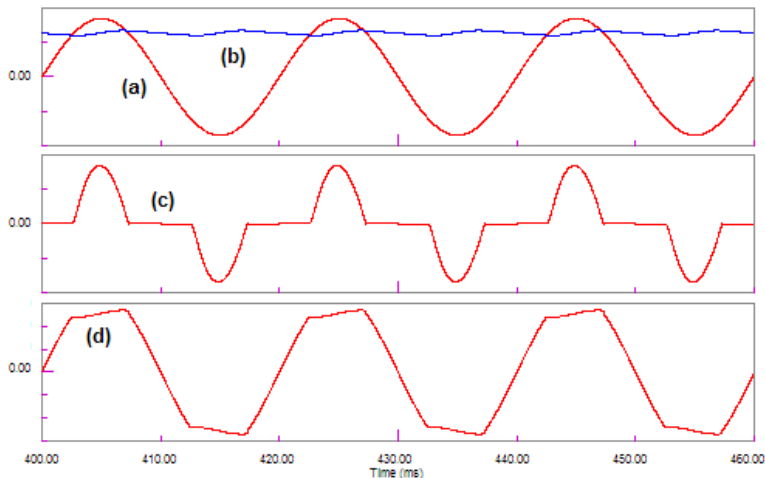
### MODE-1

Pada mode operasi ini arus mengalir dari sisi sumber menuju ke sisi beban melalui dioda  $D_1 - D_3$  karena

$$|v_s| > V_o \quad (6-14)$$

Pada mode ini karena arus sumber baru saja naik dari perpotongan dengan sumbu nol maka nilai

$$|i_s| < I_o \quad (6-15)$$



**Gambar-6.16** Tegangan dan arus pada penyearah dioda (full-bridge) yang dilengkapi tapis  $C = 10.000 \mu F$  dan  $R = 5 \text{ Ohm}$  (a) tegangan sumber (b) tegangan **DC** keluaran (c) arus sumber (d) tegangan terminal sumber

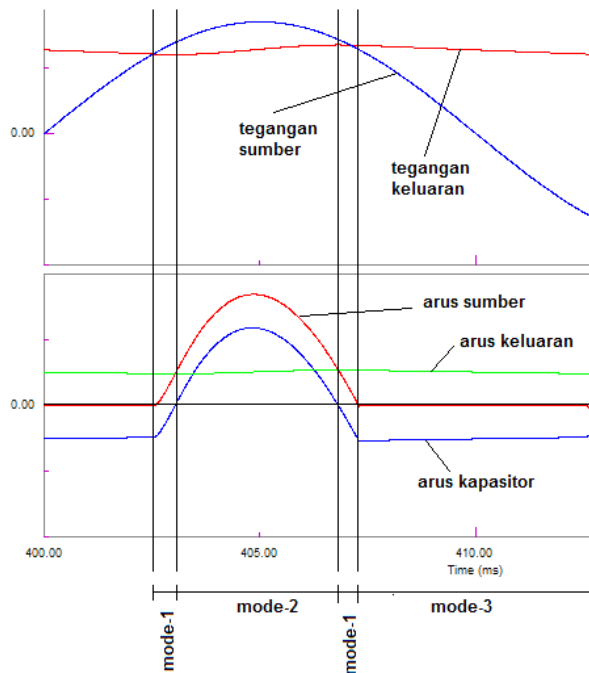


Maka untuk menjaga nilai  $I_o$  yang relatif konstan, kapasitor akan memberikan energi yang tersimpan melalui arus kapasitor yang mengalir ke sisi beban, dan diperoleh hubungan

$$I_o = i_c + |i_s| \quad (6-16)$$

Pelepasan energi kapasitor ditandai oleh tegangan kapasitor yang menurun. Mode operasi ini diakhiri dengan kondisi di mana

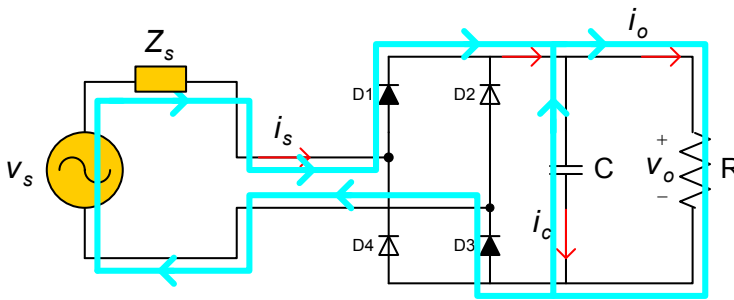
$$I_o = |i_s| \quad (6-17)$$



*Gambar-6.17 Gelombang tegangan dan arus pada penyearah dioda (full-bridge) yang dilengkapi tapis C pada beberapa mode operasi*







Gambar-6.18 Mode-1 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran

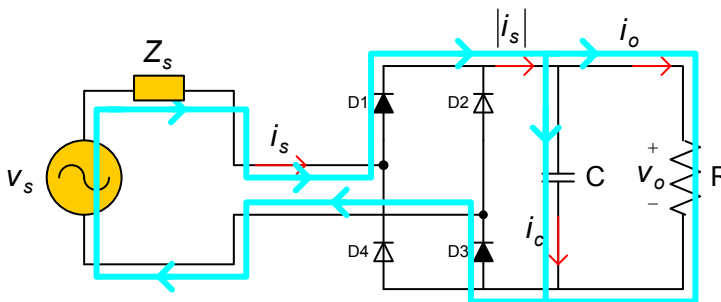
### MODE-2

Pada mode operasi ini arus mengalir dari sisi sumber menuju ke sisi beban melalui dioda  $D_1 - D_3$  karena

$$|v_s| > V_o \quad (6-18)$$

Pada mode ini *magnitude* arus sumber lebih besar dari arus keluaran

$$|i_s| > I_o \quad (6-19)$$



Gambar-6.19 Mode-2 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran

Maka untuk menjaga nilai  $I_o$  yang relatif konstan, sebagian arus sumber akan diberikan ke kapasitor untuk disimpan, dan diperoleh hubungan

$$I_o = |i_s| - i_c \quad (6-20)$$

Penyimpanan energi kapasitor ditandai oleh tegangan kapasitor yang bertambah. Mode operasi ini diakhiri dengan kondisi di mana

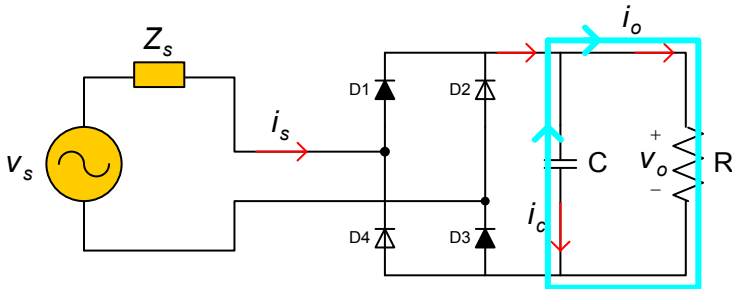
$$I_o = |i_s| \quad (6-21)$$

### MODE-3

Pada mode operasi ini arus sumber tidak dapat mengalir menuju sisi beban karena

$$|v_s| < V_o \quad (6-22)$$

Sehingga dioda akan *reverse biased* dan arus sumber sama dengan nol. Untuk menjaga agar tegangan keluaran relatif konstan maka energi yang tersimpan pada kapasitor diberikan ke sisi beban.



Gambar-6.20 Mode-3 dari operasi penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran

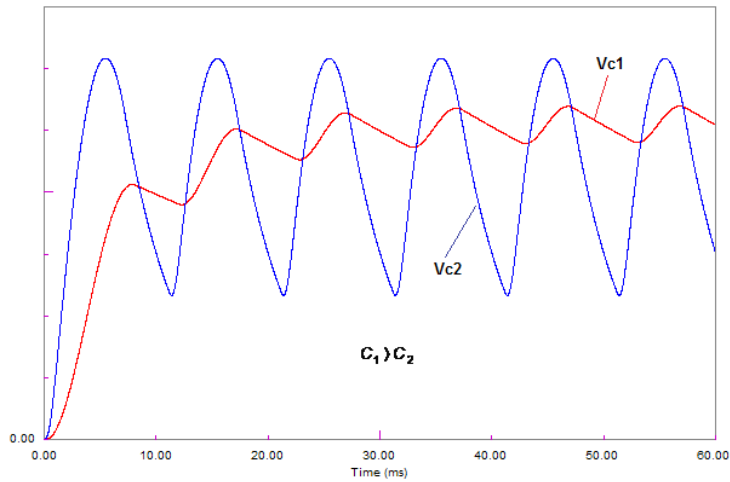
Mengacu pada uraian di atas maka akan dapat dipahami bahwa lama konduksi dioda yang berdampak pada mengalirnya arus sumber suatu penyearah akan ditentukan hubungan antara tegangan AC sumber dan tegangan DC keluaran. Suatu penyearah dioda dengan tapis kapasitor yang memiliki kapasitansi lebih besar akan memiliki kemampuan mempertahankan tegangan nilai yang lebih konstan. Dengan mengacu pada persamaan tegangan kapasitor

$$v_c = \frac{1}{C} \int i \, dt + V_o \quad (6-23)$$

maka dapat dikatakan bahwa nilai kapasitansi yang lebih besar memerlukan arus lebih besar atau waktu lebih lama agar tegangannya naik menjadi nilai tertentu. Pada Gambar-6.21 ditunjukkan nilai tegangan kapasitor pada penyearah dioda yang dilengkapi dengan tapis kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  di mana nilai  $C_1 > C_2$ . Karena jumlah lama waktu pengisian dan waktu pembuangan yang sama maka penyearah dioda dengan nilai kapasitansi yang lebih besar akan memiliki tegangan keluaran dengan riak lebih kecil. Pada saat awal pengisian, kapasitor dengan nilai kapasitansi lebih kecil akan cepat mencapai nilai tegangan tunaknya karena nilai rata-rata tegangan keluarannya lebih rendah sedangkan kapasitor dengan nilai kapasitansi lebih besar lebih lama mencapai nilai tegangan tunaknya karena nilai rata-rata tegangan keluarannya

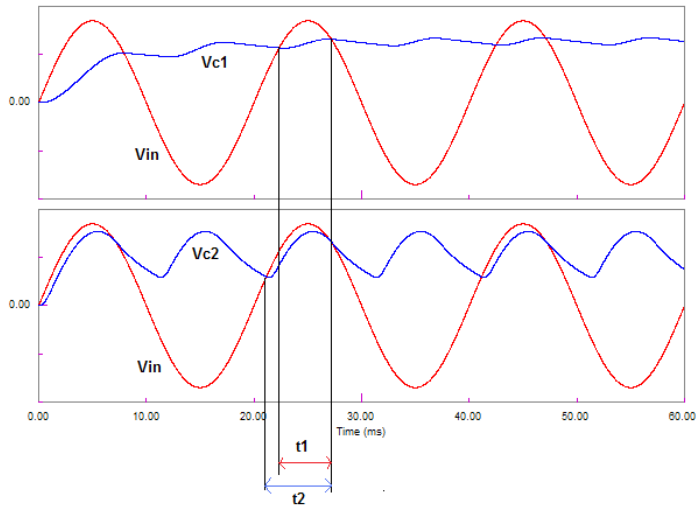


lebih tinggi. Nilai rata-rata tegangan keluaran yang lebih tinggi menyebabkan lama dioda konduksi lebih pendek (Gambar-6.22).

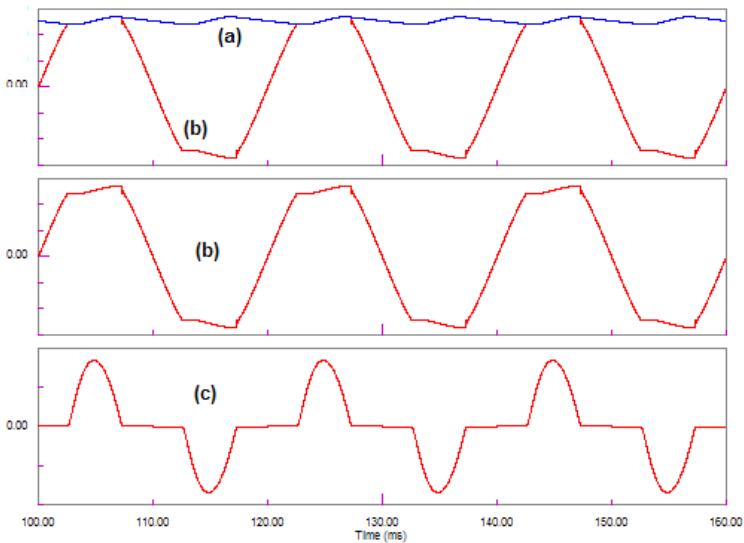


*Gambar-6.21 Tegangan kapasitor penyearah dioda yang dilengkapi tapis kapasitor pada sisi keluaran di mana  $C_1$  lebih besar dari  $C_2$*

Terpasangnya penyearah dioda yang dilengkapi oleh tapis pada kapasitor akan menyebabkan lama konduksi dioda menjadi lebih pendek dari setengah siklus tegangan sistem (10 ms), makin besar nilai kapasitor yang terpasang menyebabkan tegangan DC keluaran penyearah lebih rata tetapi mengakibatkan lama konduksi dioda menjadi lebih pendek. Sifat ketidaklinearan hubungan arus dan tegangan membuat distorsi muncul baik pada arus sumber maupun tegangan terminal sumber. Jika dioda dianggap ideal maka pada saat dioda konduksi nilai tegangan terminal sumber akan sama dengan nilai tegangan DC keluaran. Pada Gambar-6.23 dan Gambar-6.24 disajikan bentuk gelombang tegangan dan arus suatu penyearah dioda yang dilengkapi dengan tapis kapasitor sebesar 10.000  $\mu\text{F}$  pada sisi keluarannya. Pemasangan nilai kapasitor yang cukup besar membuat tegangan keluaran penyearah menjadi lebih konstan. Di sisi lain arus sumber yang terdistorsi akan mengalir pada saluran. Karena terdapat impedansi sumber maka tegangan sumber akan mengalami distorsi juga

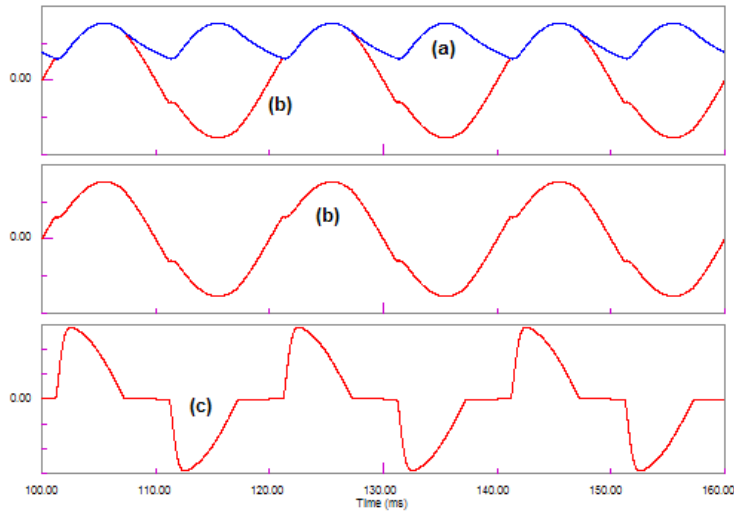


*Gambar-6.22 Nilai kapasitansi lebih besar menyebabkan lama konduksi dioda menjadi lebih pendek*



*Gambar-6.23 Gelombang pada penyearah dioda yang dilengkapi tapis  $C = 10.000 \mu\text{F}$  dan beban  $R = 5 \text{ Ohm}$  (a) tegangan **DC** keluaran (b) tegangan terminal sumber dengan  $\text{THD} = 11,7\%$  (c) arus sumber dengan  $\text{THD} = 66,3\%$*





**Gambar-6.24** Gelombang pada penyearah dioda yang dilengkapi tapis  $C = 1.000 \mu\text{F}$  dan beban  $R = 5 \text{ Ohm}$  (a) tegangan **DC** keluaran (b) tegangan terminal sumber dengan THD = 6,8% (c) arus sumber dengan THD = 47,8%

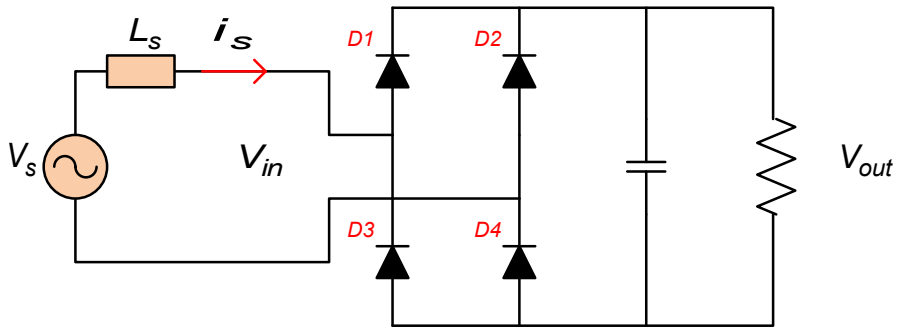
## 6.4 LATIHAN

### Latihan-1

Jelaskan bagaimana terjadinya distorsi arus masukan dari penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif.

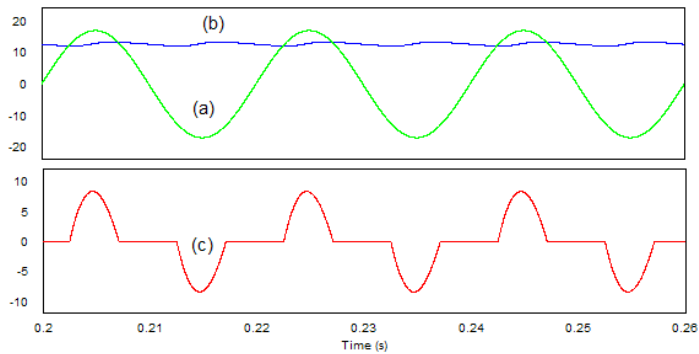
Jawab

Arus masukan suatu sistem mengalami distorsi jika bentuknya berbeda dengan tegangan. Pada penyearah satu fasa, tegangan sumber yang digunakan adalah sinusoidal sehingga jika arus yang mengalir tidak sinusoidal maka dikatakan mengalami distorsi. Pada Gambar-6.25 ditunjukkan penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif dengan impedansi sumber.



Gambar-6.25 Penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif

Adanya kapasitor pada sisi keluaran akan mengakibatkan tegangan keluaran memiliki riak yang kecil (Gambar-6.26). Arus sumber hanya akan mengalir selama tegangan sumber lebih besar dari tegangan keluaran, dengan kata lain durasi mengalirnya arus sumber lebih kecil dari durasi setengah siklus positif



Gambar-6.26 Gelombang pada penyearah dioda satu fasa berbeban kapasitif (a) tegangan sumber (b) tegangan keluaran (c) arus masukan

## Latihan-2

Jelaskan perbedaan arus masukan antara penyearah setengah gelombang dan gelombang penuh pada pembebanan dengan beban resistif.

Jawab

Pada penyearah dioda dengan beban resistif (diasumsikan kondisi ideal), dioda akan konduksi selama tegangan masukan positif. Pada penyearah dioda satu fasa setengah gelombang, hanya terdiri dari satu dioda dan akan konduksi selama setengah siklus positif. Pada setengah siklus negatif sisi sumber tidak terhubung dengan beban. Dengan demikian maka arus sumber hanya berbentuk gelombang sinusoidal selama setengah perioda. Berbeda dengan penyearah dioda satu fasa gelombang penuh. Baik pada



setengah siklus positif atau negatif sisi sumber selalu terhubung ke beban melalui dioda-dioda yang sedang konduksi sehingga arus sumber berbentuk sinusoidal penuh.

### Latihan-3

Jelaskan perbedaan antara penyearah dioda yang memiliki beban induktif dan penyearah dioda yang memiliki beban kapasitif.

Jawab

Penyearah dioda sering dimanfaatkan sebagai catu peralatan elektronik ataupun motor-motor listrik jenis DC di lapangan. Dalam implementasi sebagai catu bagi peralatan elektronik umumnya diperlukan syarat nilai tegangan yang konstan sehingga penyearah dioda harus dilengkapi dengan kapasitor untuk mengurangi riak tegangan. Makin besar kapasitor yang dipasang maka akan semakin kecil riak tegangan yang dihasilkan. Dampak dari pemasangan kapasitor adalah distorsi arus masukan. Makin besar nilai kapasitor yang dipasang maka akan semakin singkat durasi dioda konduksi sehingga tingkat distorsi akan semakin besar. Sedangkan dalam implementasi sebagai catu motor listrik yang didominasi belitan maka dapat dianggap sebagai beban induktif. Sifat induktor yang cenderung mempertahankan nilai arus menyebabkan arus sumber memiliki bentuk mendekati gelombang persegi.

### DAFTAR PUSTAKA

1. Sen, P., C., (1993), *Power Electronics*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi
2. William, B., W., (1992), *Power Electronics : Devices, Drivers, Applications and Passive Components*, ELBS, British
3. Mohan, N., Undeland, T., M., Robbins, W., P., (1994), *Power Electronics : Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons
4. Rashid, M. H. (1993) : *Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications*, Prentice Hall International Inc



**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**



## Motor Brushless DC

### 7.1 DASAR MOTOR BLDC (BRUSHLESS DC)

Dalam banyak aplikasi motor arus searah (motor DC) memegang peranan yang sangat penting. Fitur menguntungkan dari motor DC ini di antaranya memiliki torka awal yang besar dan mudah dalam mengatur kecepatannya. Sedangkan beberapa kendala muncul dalam pemakaian motor jenis ini yang meliputi perawatan yang rutin serta harga mahal, belum lagi adanya sikat dan komutator yang menurunkan unjuk kerjanya. Motor DC tanpa sikat (Brushless Direct Current = BLDC) merupakan pengembangan dari motor DC dengan memanfaatkan rangkaian elektronika daya sebagai pengganti sikat dan komutator. Secara konstruksi, motor BLDC memiliki rotor yang memiliki magnet permanen dan stator berupa belitan.

Dengan mengambil asumsi motor BLDC yang diamati adalah jenis tiga fasa maka persamaan tegangan fasa-A, fasa-B dan fasa-C dapat diturunkan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_b & L_c \\ L_b & L_b & L_b \\ L_a & L_b & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (7-1)$$

di mana  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{bc}$ ,  $L_{ca}$  dan  $L_{cb}$  adalah induktansi bersama tiga fasa (mutual inductance),  $L_a$ ,  $L_b$  dan  $L_c$  adalah induktansi sendiri (self inductance),  $v_a$ ,  $v_b$  dan  $v_c$  adalah tegangan fasa,  $e_a$ ,  $e_b$  dan  $e_c$  adalah BEMF (back electromotive force),  $i_a$ ,  $i_b$  dan  $i_c$  adalah arus fasa,  $R_a$ ,  $R_b$  dan  $R_c$  adalah tahanan belitan stator. Dengan menggunakan asumsi bahwa reluktansi rotor tidak berubah terhadap posisinya dan belitan fasa dianggap simetris dan identik, maka

$$L_a = L_b = L_c = L_s \quad (7-2)$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M \quad (7-3)$$

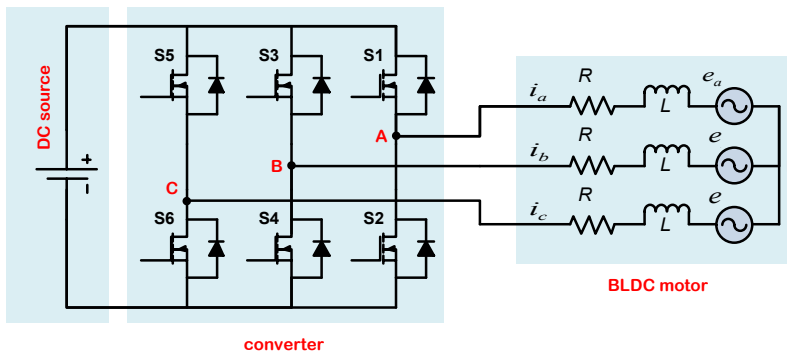
$$L_s - M = L \quad (7-4)$$

$$R_a = R_b = R_c = R \quad (7-5)$$

Dengan menggunakan R, L dan M yang merupakan tahanan, induktansi diri dan induktansi bersama dari belitan stator maka persamaan (7-1) dapat disederhanakan menjadi

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

Mengacu persamaan di atas maka rangkaian ekuivalen motor BLDC tiga fasa yang dihubungkan ke sumber tegangan DC melalui inverter tiga fasa disajikan pada Gambar-7.1



Gambar-7.1 Rangkaian ekuivalen motor BLDC tiga fasa beserta inverter

Gaya gerak listrik balik (BEMF) dari motor BLDC tiga fasa saling tergeser sebesar 120 derajat dan dapat dinyatakan

$$e_a = K_e f(\theta_e) \omega_m \quad (7-7)$$

$$e_b = K_e f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \quad (7-8)$$

$$e_c = K_e f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \quad (7-9)$$

di mana

$\omega_m$  = kecepatan rotor (rad/s)



$K_e$  = konstanta BEMF (Volt.s/rad)

$f(\theta_e)$  = fungsi trapezoidal

$\theta_e$  = posisi rotor dalam derajat listrik (rad)

Dengan menggunakan konservasi energi mekanik ( $E_{mech}$ ) dan energi listrik ( $E_{elect}$ ) maka dapat diturunkan persamaan-persamaan berikut untuk menentukan torka elektromagnet ( $T_e$ )

$$E_{mech} = E_{elect}$$

$$T_e \omega_m = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

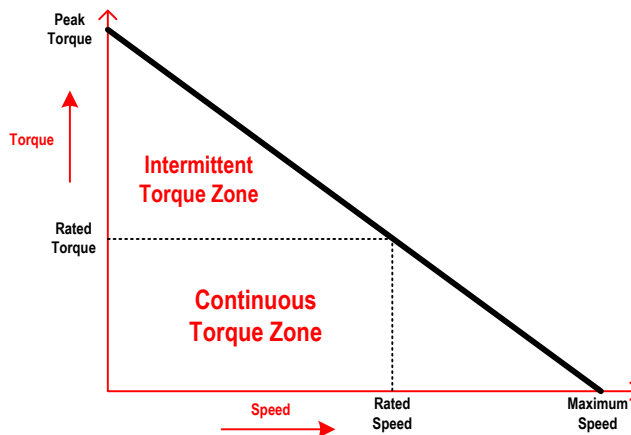
$$T_e = \frac{[K_e f(\theta_e) \omega_m] i_a + [K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega_m] i_b + [K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega_m] i_c}{\omega_m}$$

$$T_e = K_e \left[ f(\theta_e) i_a + f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (7-10)$$

Pada kondisi tunak, torka elektromagnet akan sama dengan torka beban dan dinyatakan dengan persamaan

$$T_e = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_m + \beta \omega_m \quad (7-11)$$

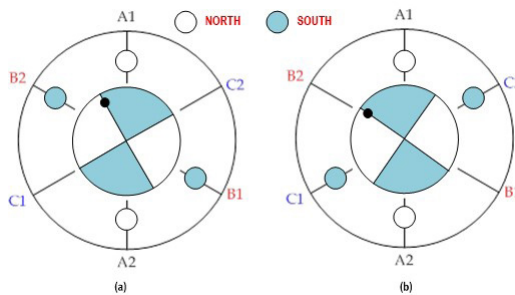
Mengacu pada persamaan (7-10) maka hubungan antara torka dan kecepatan dari motor BLDC dapat disajikan dalam bentuk kurva karakteristik.



Gambar-7.2 Kurva karakteristik torka terhadap kecepatan dari motor BLDC

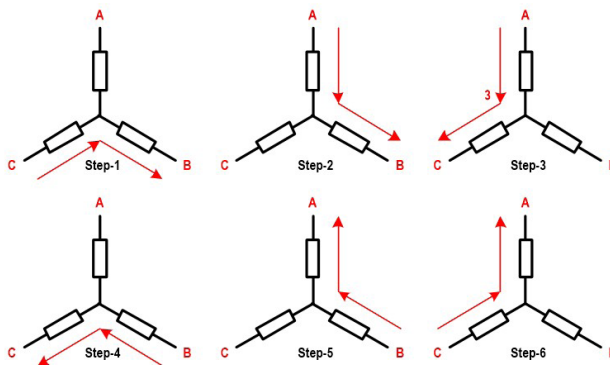
## 7.2 PENGGERAK MOTOR BLDC

Rotor suatu motor BLDC berputar karena adanya interaksi antara kutub magnet pada rotor dengan elektromagnet pada stator. Pada motor BLDC tiga fasa, umumnya setiap saat selalu ada dua belitan fasa yang menjadi magnet, satu fasa menjadi kutub magnet utara (north pole) dan satu fasa lainnya menjadi kutub magnet selatan (south pole). Pada Gambar-7.3a ditunjukkan posisi rotor dan stator motor BLDC saat belitan stator fasa-A dan fasa-B menjadi kutub magnet utara dan selatan, agar rotor berputar berlawanan arah dengan jarum jam (CCW = Counter Clock Wise) maka fasa-B harus dimatikan dan digantikan dengan fasa-C yang menjadi kutub magnet selatan. Untuk memberikan eksitasi pada belitan stator maka diperlukan informasi posisi rotor agar fasa-fasa yang sesuai dapat dieksitasi menjadi kutub magnet yang tepat sehingga menghasilkan torka dengan arah sama.



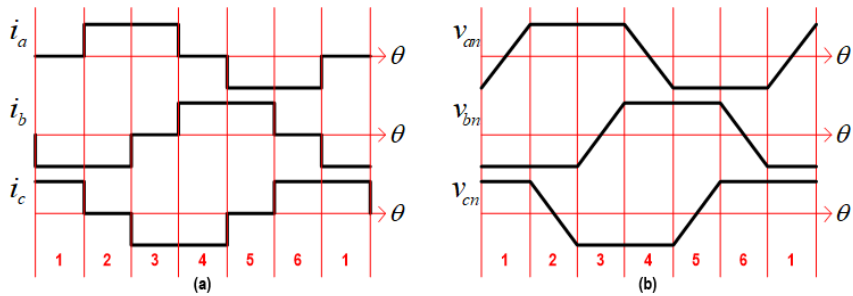
*Gambar-7.3* Bagian stator dan rotor dari motor BLDC (a) kondisi setimbang saat fasa-A dan fasa B menjadi kutub magnet utara – selatan (b) kondisi setimbang saat fasa-A dan fasa C menjadi kutub magnet utara – selatan

Dimisalkan belitan stator motor BLDC tiga fasa dihubungkan secara bintang (Y) maka urutan belitan stator yang dieksitasi ditunjukkan pada Gambar-7.4, dalam satu siklus terdapat enam langkah di mana masing-masing langkah terdapat dua fasa yang dieksitasi.



*Gambar-7.4* Urutan langkah dalam satu siklus untuk motor BLDC tiga fasa

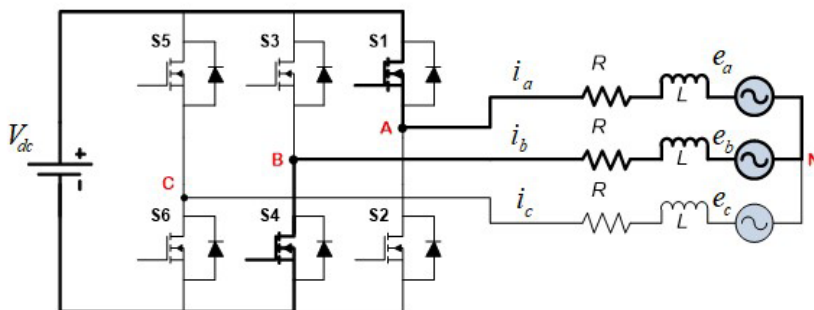




Gambar-7.5 Gelombang ideal pada keenam langkah motor BLDC tiga fasa (a) arus fasa (b) tegangan fasa

Dengan menggunakan konverter pada Gambar-7.1 maka urutan langkah-langkah pada Gambar-7.4 dapat direalisasikan. Sebagai contoh untuk merealisasikan step-2 di mana belitan fasa-A terhubung ke terminal positif tegangan sumber ( $V_{dc}$ ) dan belitan fasa-B terhubung ke terminal negatif sumber. Persamaan yang dapat diturunkan pada kondisi ini disajikan di bawah

$$V_{dc} = 2Ri_a + 2L \frac{di_a}{dt} + e_a - e_b \quad (7-12)$$



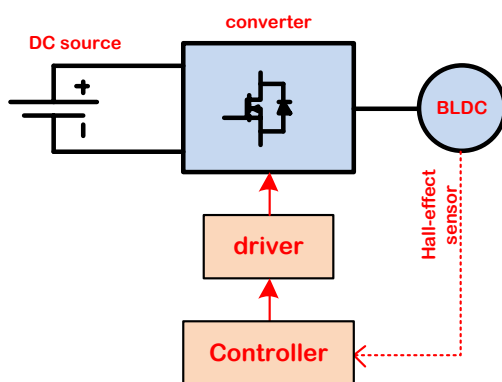
Gambar-7.6 Rangkaian ekuivalen saat S1 – S2 konduksi untuk merealisasikan step-2

Pada Tabel-7.1 disajikan kondisi saklar-saklar yang konduksi (ON) ataupun yang mati (OFF), begitu juga fasa-fasa yang aktif (active phase winding) atau yang tidak aktif (inactive phase winding).

Tabel-7.1 Urutan berputar motor BLDC

Step	Upper Switch	Lower Switch	Phase-A	Phase-B	Phase-C
#1	S5	S4	off	negatif	positive
#2	S1	S4	positive	negatif	off
#3	S1	S6	positive	off	negatif
#4	S3	S6	off	positive	negatif
#5	S3	S2	negatif	positive	off
#6	S5	S2	negatif	off	positive

Dengan berkembangnya kendali berbasis digital, aplikasi penggerak motor BLDC menyebar ke berbagai bidang aplikasi. Dari sisi kendali digital beberapa perangkat yang sering dipakai sebagai inti dari rangkaian kendali meliputi DSP (Digital Signal Processor), mikrokontroler, FPGA (Field Programmable Gate Array) dan lain-lain. Pada Gambar-7.7 ditunjukkan skema blok dari penggerak listrik berbasis motor BLDC. Untuk mengetahui informasi posisi rotor digunakan hall effect sensor. Dalam banyak aplikasi lanjut, dapat pula tidak menggunakan sensor yang dipasang secara hardware melainkan dengan deteksi besaran motor, misalkan BEMF atau lainnya, sistem ini sering dikenal dengan sensorless based control.



Gambar-7.7 Blok penggerak listrik berbasis motor BLDC

### 7.3 PENEREMAN REGENERATIF PADA MOTOR BLDC

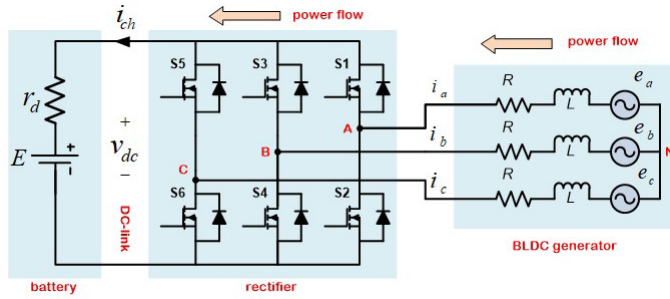
Salah satu aplikasi terpenting dari penggerak listrik berbasis BLDC adalah kendaraan listrik (electric vehicle). Untuk menambah efisiensi kendaraan maka pengereman regeneratif menjadi solusi yang tepat, pengereman regeneratif



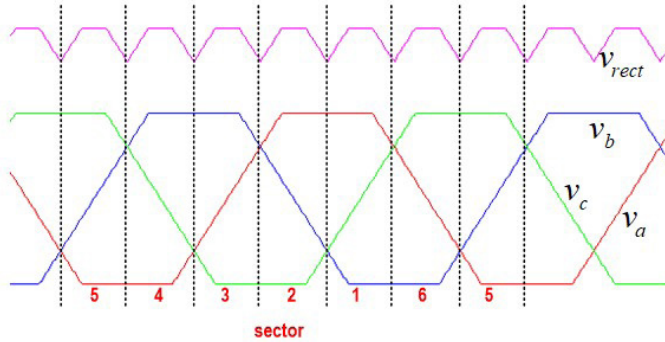
merupakan pengereman yang mampu mengubah energi kinetik kendaraan (putaran motor BLDC) menjadi energi listrik dan selanjutnya dikirimkan ke batere. Beberapa persyaratan diperlukan agar pengereman regeneratif dapat dilakukan, di antaranya adalah tegangan balik motor (BEMF) lebih besar dari batere. Dengan mempertimbangkan bahwa BEMF berbanding lurus dengan kecepatan motor maka kondisi tersebut akan terpenuhi saat kendaraan listrik berada pada jalur yang menurun. Tetapi dengan mengadopsi fungsi chopper jenis boost maka walaupun nilai BEMF lebih kecil dari tegangan batere, pengereman regeneratif tetap dapat dilakukan. Pada laporan penelitian ini, pembahasan pengereman regeneratif difokuskan pada sistem dengan mengadopsi boost chopper.

Agar energi listrik yang dihasilkan oleh generator BLDC dapat dikirimkan ke batere maka tegangan keluaran generator harus dinaikkan dengan menggunakan konverter yang dioperasikan sebagai boost chopper. Sebagai catatan bahwa chopper jenis ini memiliki 2 mode operasi, yaitu saat energi listrik disimpan pada induktor (saklar bagian bawah ON) dan energi listrik dikirimkan ke batere (melalui dioda, seluruh saklar OFF). Akibat adanya energi kinetik yang memutar motor BLDC maka operasi sebagai generator BLDC yang menjadi acuan dalam kajian. Dalam kajian ini generator BLDC diasumsikan memiliki BEMF berbentuk trapezoidal dan belitan stator terhubung secara bintang. Konverter tiga fasa yang awalnya berfungsi sebagai inverter (pengubah dari DC ke AC) sekarang berubah fungsi menjadi rectifier atau penyearah (pengubah dari AC ke DC) seperti tampak pada Gambar-7.8. Bentuk tegangan fasa (BEMF) yang dihasilkan dan tegangan setelah disearahkan ditunjukkan pada Gambar-7.9, dioda pada lengan atas akan konduksi hanya saat tegangan fasanya berada pada nilai paling tinggi, begitu pula dioda pada lengan bawah akan konduksi saat nilai tegangan fasanya berada pada nilai paling rendah. Sebagai contoh pada sektor-1, tegangan tertinggi berada pada fasa-A dan tegangan terendah berada pada fasa-B ( $v_a > v_c > v_b$ ) maka yang akan konduksi adalah dioda  $D_1$  dan  $D_4$ . Secara detil kondisi konduksi dari dioda-dioda dapat dilihat pada Tabel-7.2. Dengan mengacu sifat dioda yang akan konduksi saat tegangan anodanya lebih besar dari tegangan katodanya maka dioda akan konduksi saat tegangan BEMF (line-line) tertinggi lebih besar dari tegangan DC-link.





Gambar-7.8 Generator BLDC dan penyearah tiga fasa



Gambar-7.9 Tegangan keluaran generator BLDC dan tegangan keluaran penyearah tiga fasa

Tabel-7.2 Konduksi dioda pada penyearah tiga fasa untuk generator BLDC

Sektor	Upper Diode	Lower Diode	Highest Phase	Lowest Phase
#1	D1	D4	Phase-A	Phase-B
#2	D1	D6	Phase-A	Phase-C
#3	D3	D6	Phase-B	Phase-C
#4	D3	D2	Phase-B	Phase-A
#5	D5	D2	Phase-C	Phase-A
#6	D5	D4	Phase-C	Phase-B

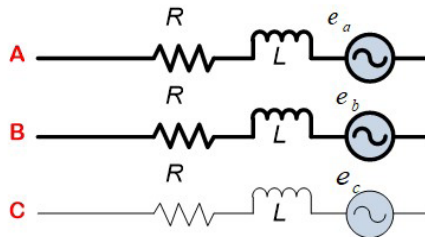
Pada Gambar di bawah disajikan suatu generator BLDC dengan terminal A-B terhubung ke belitan fasa-A dan belitan fasa-B. Pada masing-masing belitan fasa akan terdapat elemen tahanan, induktansi dan tegangan induksi (BEMF). Pada belitan terminal A-B akan terdapat elemen ekuivalen berupa tahanan ( $2R$ ), induktansi ( $2L$ ) dan tegangan induksi ( $e_a$  dan  $e_b$ ). Agar pengisian ke batere dapat terjadi maka nilai  $i_{ch}$  harus positif, dengan menggunakan persamaan

$$i_{ch} = \frac{V_d - E}{r_d} \quad (7-13)$$

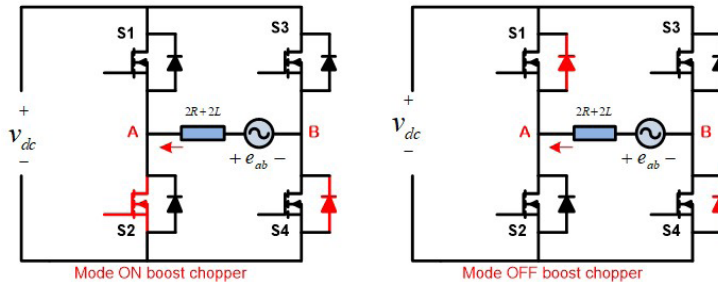




di mana  $V_{dc}$ ,  $E$  dan  $r_d$  adalah tegangan DC-link, tegangan ggl batere dan tahanan dalam batere. Untuk menaikkan nilai  $V_{dc}$  maka diadopsi konsep boost chopper. Proses menaikkan tegangan pada chopper menggunakan dua mode operasi, yaitu mode operasi-1 saat saklar  $S_2$  dan dioda  $D_4$  konduksi maka energi dari BEMF  $e_a$  dan  $e_b$  akan disimpan pada induktor stator fasa-A dan fasa-B, dengan mengabaikan tahanan stator maka persamaan pada kondisi ini dapat diturunkan.



Gambar-7.10 Terminal A-B dari generator BLDC pada sektor-1



Gambar-7.11 Mode operasi chopper pada sektor-1

Saat mode operasi saklar  $S_2$  dan dioda  $D_4$  konduksi :

$$e_{ab} = 2L \frac{di_a}{dt} \tag{7-14}$$

$$\Delta i_a = \frac{e_{ab}}{2L} t_{on}$$

Saat mode operasi saklar  $D_1$  dan dioda  $D_4$  konduksi :

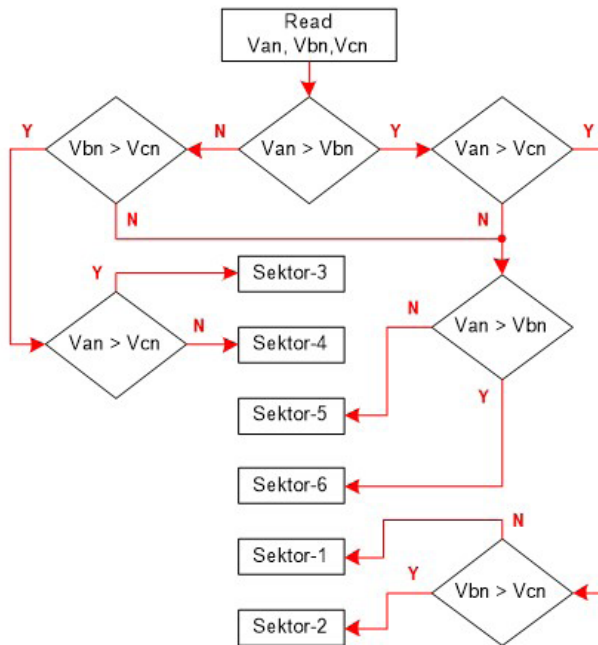
$$V_{dc} = 2L \frac{di_a}{dt} + e_{ab}$$

$$\Delta i_a = \frac{V_{dc} - e_{ab}}{2L} t_{off} \tag{7-15}$$

Dengan substitusi persamaan (4-14) dan (4-15) akan diperoleh

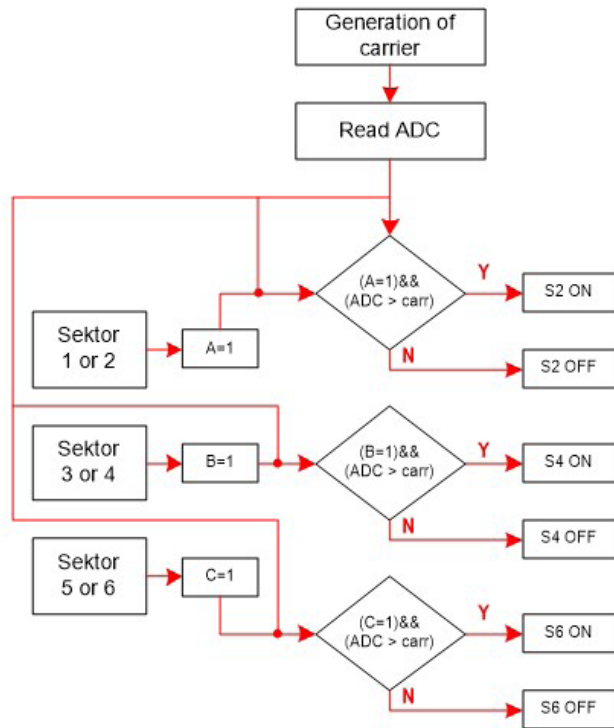
$$\begin{aligned} \frac{e_{ab}}{2L} t_{on} &= \frac{V_{dc} - e_{ab}}{2L} t_{off} \\ e_{ab} t_{on} &= (V_{dc} - e_{ab}) t_{off} \\ e_{ab} t_{on} + e_{ab} t_{off} &= V_{dc} (T - t_{on}) \\ e_{ab} T &= V_{dc} (T - t_{on}) \\ \frac{V_{dc}}{e_{ab}} &= \frac{T}{(T - t_{on})} = \frac{1}{1 - \frac{t_{on}}{T}} = \frac{1}{1 - d} \end{aligned} \quad (7-16)$$

Persamaan (7-16) menunjukkan bahwa dengan mengatur duty cycle ( $d$ ) maka nilai tegangan DC-link dapat dikendalikan.



Gambar-7.12 Diagram alir untuk menentukan sektor





*Gambar-7.13 Diagram alir untuk operasi regenerative braking motor BLDC*

## Daftar Pustaka

1. M. Yildirim, M. Polat and H. Kurum, (2014), A Survey on Comparison of Electric Motor Types and Drives Used for Electric Vehicles, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition
2. K. C. Manjunatha and Manjesh, (2017), Design and Development of Fly-Back Converter with Buck-Boost Regulator for DC Motor used in Electric Vehicle for the Application of Renewable Energy, International Conference on circuits Power and Computing Technologies, India
3. S. H. Seo, G. J. Park, Y. J. Kim<sup>2</sup> and S. Y Jung, (2017), Design Method on Induction Motor of Electric Vehicle for Maintaining Torque Performance at Field Weakening Region , M. Farasat and E. Karaman, (2011), Speed Sensorless Electric Vehicle Propulsion System Using Hybrid FOC-DTC Induction Motor Drive, International Conference on Electrical Machines and Systems



4. M. Farasat and E. Karaman, (2011), Speed Sensorless Electric Vehicle Propulsion System Using Hybrid FOC-DTC Induction Motor Drive, International Conference on Electrical Machines and Systems
5. Y. Sangsefidi, S. Ziaeinejad and A. Shoulaie, (2011), Torque ripple reduction of BLDC motors by modifying the non-commutating phase voltage, International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE), pp. 308 – 312
6. S. J. Kim, J. H. Park and D. H. Lee (2018), Torque ripple reduction of the BLDC motor using a modified 3-phase conduction method, 2018 International ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI-NCON), pp. 34 – 39
7. U. Neethu and V. R. Jisha V, (2012), Speed Control of Brushless DC Motor: A Comparative Study, 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy System, India
8. M. Masmoudi, B. Badsı, and A. Masmoudi, (2014), Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives With Improved Reliability, IEEE Trans. on Industry Application, Vol.50-14, No.6, pp.3744-5733, Nov-Dec 2014
9. X. Nian, F. Peng, and H. Zhang, (2014), Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.61, No.10, pp.2365-2373, oct 2014
10. M. Akhila and P. Ratnan, (2016), Brushless DC Motor Drive with Regenerative Braking using Adaptive Neuro based Fuzzy Inference System, International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)
11. X. Jiaqun and C. Haotian, (2015), Regenerative Brake of Brushless DC Motor for Light Electric Vehicle, 18th International Conference on Electrical Machines and Systems
12. Y. Wei, Y. Xu, J. Zou and Y. Li, (2014), Current Limit Strategy for BLDC Motor Drive with Minimized DC-Link Capacitor, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China



13. S. Riyadi (2017), Digital Control for a PV Powered BLDC Motor, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 8, No. 4, December 2017, pp. 1714-1722



**Program Studi Teknik Elektro  
Soegijapranata Catholic University  
Semarang**

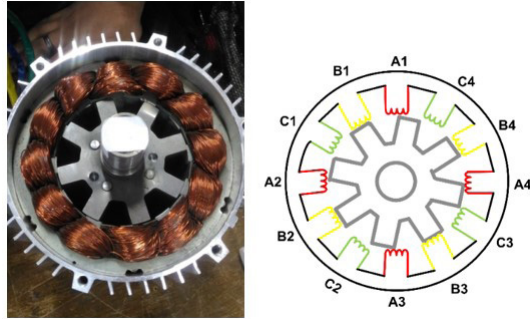
## **Motor Switched Reluctance**

### 8.1 DASAR MESIN SWITCHED RELUCTANCE (SRM)

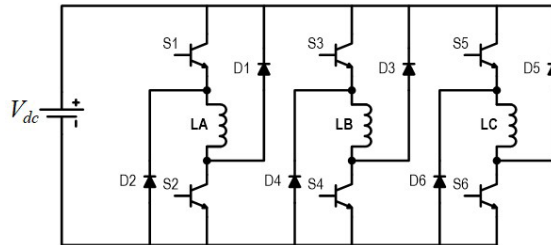
Berkembangnya teknologi ramah lingkungan dalam bidang transportasi dapat dijumpai dalam bentuk kendaraan listrik dan kendaraan hybrid listrik. Kedua tipe kendaraan tersebut menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama/cadangan pada kendaraan. Pada aplikasi tersebut dibutuhkan motor listrik yang memiliki torka besar sehingga mampu menyediakan tenaga agar pencapaian kecepatan tertentu dapat dilakukan dalam rentang waktu singkat. Pada saat terjadi pengereman, kendaraan harus juga mampu melakukan pengereman regeneratif, yaitu suatu pengereman yang mampu mengubah energi kinetik kendaraan menjadi energi listrik yang disimpan ke dalam baterai. Sistem pengereman ini akan meningkatkan efisiensi. Mesin switched reluctance menawarkan beberapa keunggulan mencakup :

- kesederhanaan konstruksi, rotor tidak memiliki belitan ataupun magnet permanen serta stator memiliki belitan sederhana
- mudah dalam perawatan
- murah dalam fabrikasi
- mampu beroperasi pada kecepatan tinggi
- kokoh

Pada Gambar-8.1 ditunjukkan suatu mesin switched reluctance tiga fasa dengan 12 kutub stator dan 8 kutub rotor. Keduabelas belitan stator akan dibagi ke dalam tiga fasa. Untuk mengoperasikan mesin ini maka diperlukan suatu konverter. Karena rotor bukan merupakan magnet permanen maka polaritas arus stator tidak akan mempengaruhi torka. Konverter asymmetric digunakan untuk mengatur arus stator secara sekuensial seperti pada Gambar-8.1.



*Gambar-8.1 Motor switched reluctance dengan 12 kutub stator dan 8 kutub rotor (12/8 SRM)*

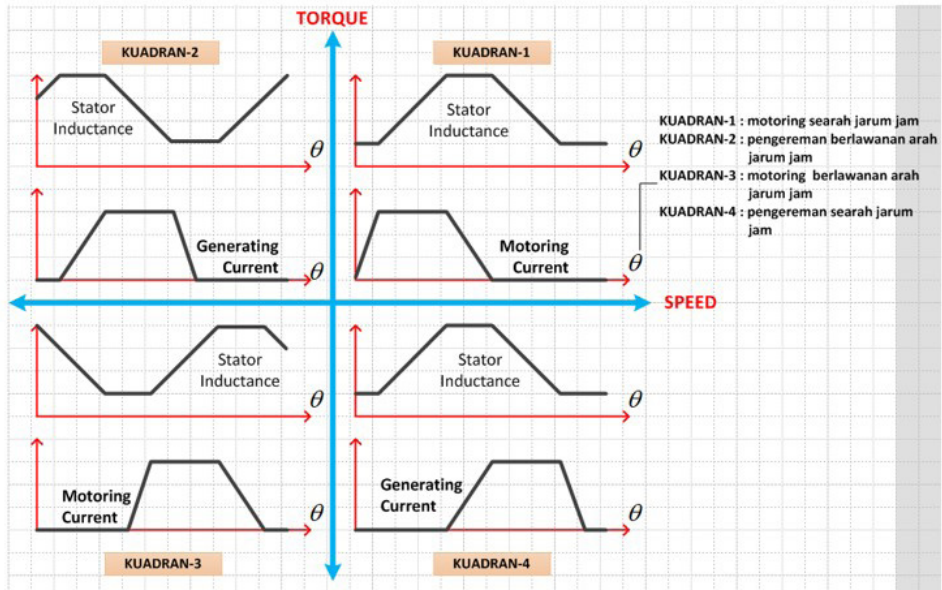


*Gambar-8.2 Konverter jenis asymmetric 3 fasa untuk motor switched reluctance*

Operasi mesin switched reluctance dapat berada pada kuadran yang berbeda mengacu pada sudut pandang torka dan kecepatan. Dengan mengambil besaran torka sebagai sumbu ordinat dan besaran kecepatan sebagai sumbu aksis maka pada kuadran-1, operasi mesin switched reluctance akan memiliki nilai torka positif dan kecepatan positif. Kondisi ini mengindikasikan bahwa mesin switched reluctance akan bekerja sebagai motor dengan arah putar maju. Pada kuadran-2, operasi mesin switched reluctance akan memiliki nilai torka positif dan kecepatan negatif. Kondisi ini menunjukkan arah putar reverse dan mesin switched reluctance bekerja sebagai generator. Pada kuadran-3, operasi mesin switched reluctance akan memiliki nilai torka negatif dan kecepatan negatif. Kondisi ini menunjukkan arah putar reverse dan mesin switched reluctance bekerja sebagai motor. Sedangkan pada kuadran-4, operasi mesin switched reluctance akan memiliki nilai torka negatif dan kecepatan positif. Kondisi ini menunjukkan arah putar maju dan mesin switched reluctance bekerja sebagai generator.



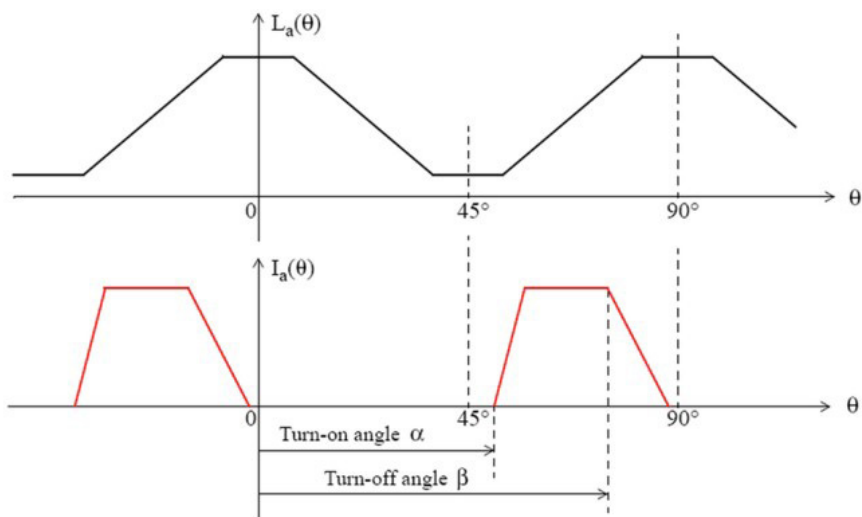




Gambar-8.3 Kuadran operasi untuk mesin switched reluctance

## 8.2 OPERASI SRM PADA KUADRAN 1

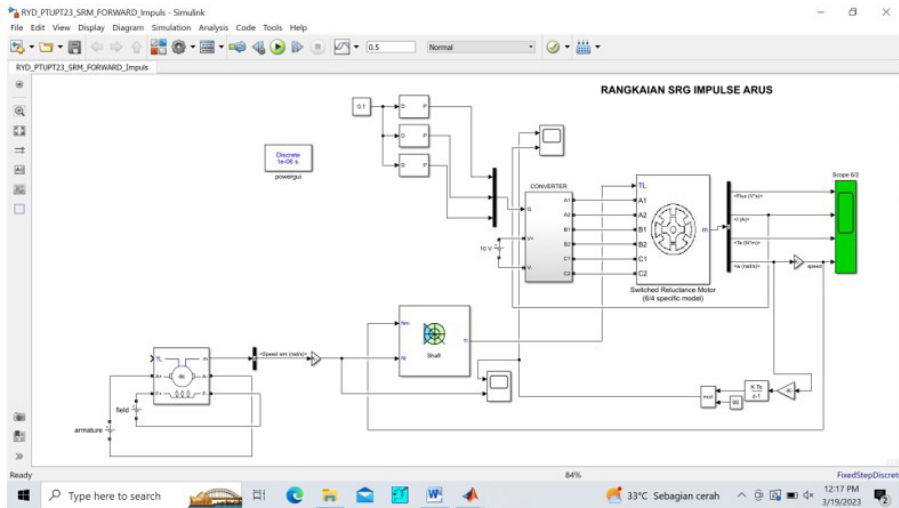
Pada Gambar-8.4 di bawah ditunjukkan profil induktansi stator salah satu fasa dari mesin switched reluctance, tampak bahwa nilai induktansi akan naik dan turun bergantung pada posisi rotor terhadap stator. Saat posisi rotor segaris (aligned) dengan kutub stator maka nilai induktansi akan maksimum, demikian sebaliknya saat posisi rotor kuadratur (unaligned) dengan kutub stator maka nilai induktansi akan minimum. Gambar di bawah menunjukkan profil induktansi stator dengan jumlah kutub empat di mana nilai induktansi akan berulang setelah melewati sudut  $90^\circ$ . Untuk mengoperasikan mesin switched reluctance sebagai motor maka arus eksitasi harus diberikan ke stator saat nilai induktansi naik (gradien induktansi positif), secara ideal antara sudut  $45^\circ$  hingga  $90^\circ$ . Perulangan sudut rotor berada pada nilai  $90^\circ$  disebabkan rotor memiliki empat kutub (mesin switched reluctance  $6/4 = 6$  kutub stator & 4 kutub rotor)



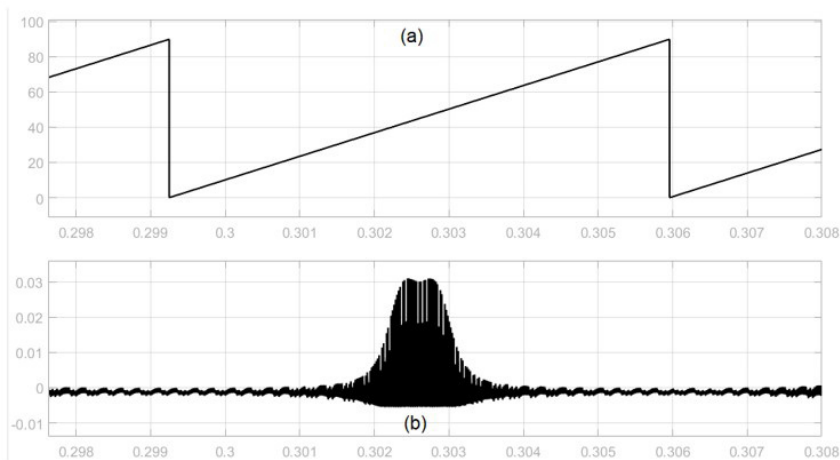
*Gambar-8.4* Profil induktansi belitan stator fasa-A terhadap sudut rotor dan sinyal eksitasi dalam operasi mesin switched reluctance sebagai motor

Dengan menggunakan simulasi SIMULINK pada MATLAB (Gambar-8.5) maka profil induktansi dapat didekati dengan proses injeksi tegangan pada stator. Pada rangkaian simulasi terdapat mesin switched reluctance yang diputar dengan motor DC, setelah berputar maka pada belitan stator dari mesin switched reluctance akan diinjeksikan tegangan dengan magnitude kecil tetapi memiliki frekuensi cukup tinggi. Suatu belitan stator dapat dianggap sebagai rangkaian induktif sehingga dengan adanya tegangan maka akan mengalir arus dengan bentuk fungsi eksponensial. Rotor yang berputar akan menyebabkan nilai induktansi belitan stator berubah, nilai induktansi stator yang lebih kecil akan menghasilkan nilai arus stator lebih besar begitu juga sebaliknya. Dengan mengamati arus hasil injeksi tegangan pada belitan stator mesin switched reluctance maka didapat korelasi bahwa semakin tinggi arus belitan stator saat injeksi maka akan semakin kecil nilai induktansi belitan stator (Gambar-8.6).





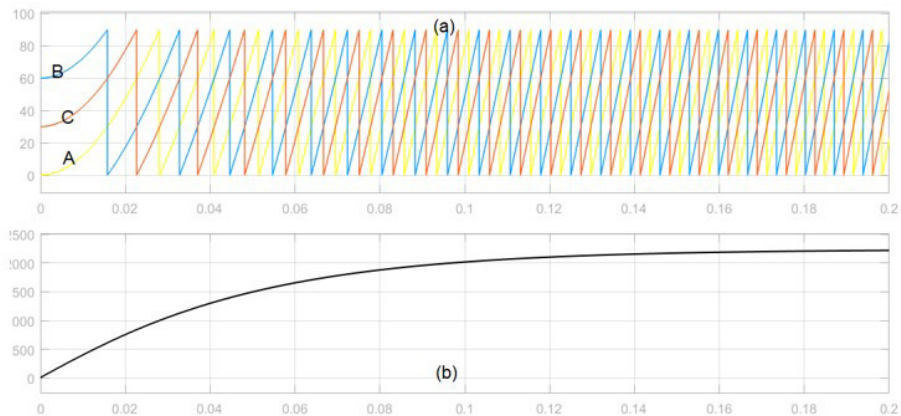
**Gambar-8.5** Rangkaian SIMULINK untuk menentukan profil induktansi mesin switched reluctance



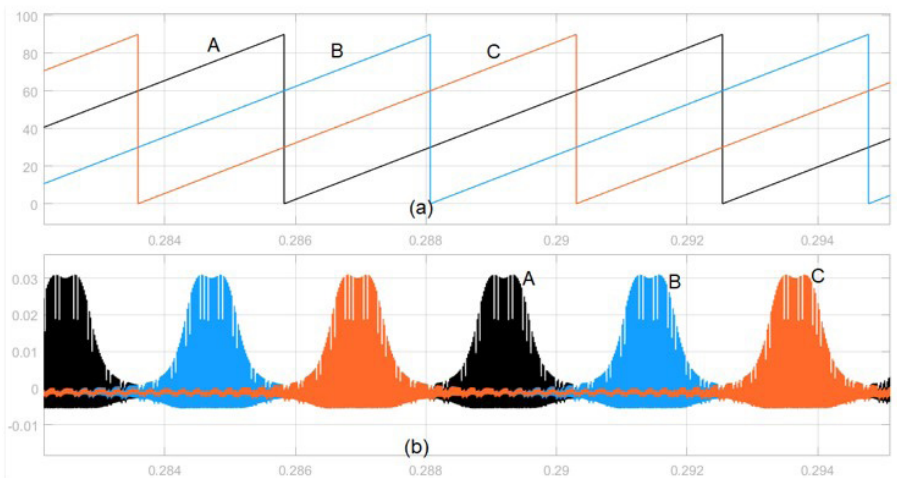
**Gambar-8.6** Hasil injeksi tegangan pada stator mesin switched reluctance untuk menentukan profil induktansi (a) sudut rotor (b) arus stator

Pada Gambar-8.6a ditampilkan posisi rotor dalam bentuk sudut yang secara berulang naik dari nilai  $0^\circ$  hingga  $90^\circ$ , sudut ini menggambarkan bahwa rotor berputar melewati stator, menghasilkan posisi aligned (sejajar kutub stator) dan unaligned (kuadratur terhadap kutub stator). Nilai arus stator (Gambar-8.6b) memberikan nilai tinggi di sekitar sudut  $45^\circ$ , hal ini menunjukkan nilai induktansi stator di sekitar sudut tersebut bernilai minimum yang berarti posisi rotor dan stator saling kuadratur. Selanjutnya untuk mesin switched reluctance tiga fasa, belitan fasa-A, fasa-B dan fasa-C akan secara bergantian

dilalui oleh kutub rotor. Jika rotor berputar arah maju (forward direction) maka urutan kutub stator yang dilalui rotor adalah fasa-A, fasa-B dan fasa-C. Arah maju ditandai dengan nilai kecepatan positif (Gambar-8.7 dan Gambar-8.8).



*Gambar-8.7 Operasi mesin switched reluctance sebagai motor putaran maju  
(a) posisi sudut rotor (b) kecepatan rotor*



*Gambar-8.8 Operasi mesin switched reluctance sebagai motor putaran maju  
(a) posisi sudut rotor (b) arus impuls*

Mengacu informasi dari profil inductansi di atas maka selanjutnya dapat dirancang kendali sederhana (open loop) untuk mengoperasikan mesin switched reluctance sebagai motor arah maju (operasi pada kuadran-1). Beberapa faktor penting yang dijadikan acuan adalah :

- Informasi posisi rotor menjadi masukan
- Setiap belitan fasa stator akan dikenai tegangan eksitasi saat profil

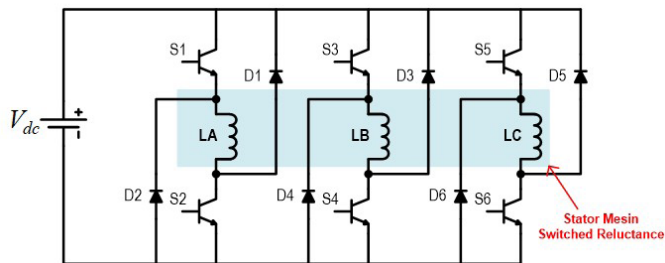


induktansinya naik atau saat rotor bergerak dari posisi unaligned menuju posisi aligned

- Diasumsikan digunakan konverter jenis asymmetric sebagai penggerak mesin tersebut.

Pada Gambar-8.9 ditunjukkan skema rangkaian konverter asymmetric tiga fasa yang akan digunakan untuk menggerakkan motor switched reluctance tiga fasa tipe 6/4. Masing-masing lengan terdapat dua buah saklar dan dua buah dioda. Konfigurasi saklar yang mungkin terbentuk ada tiga macam,

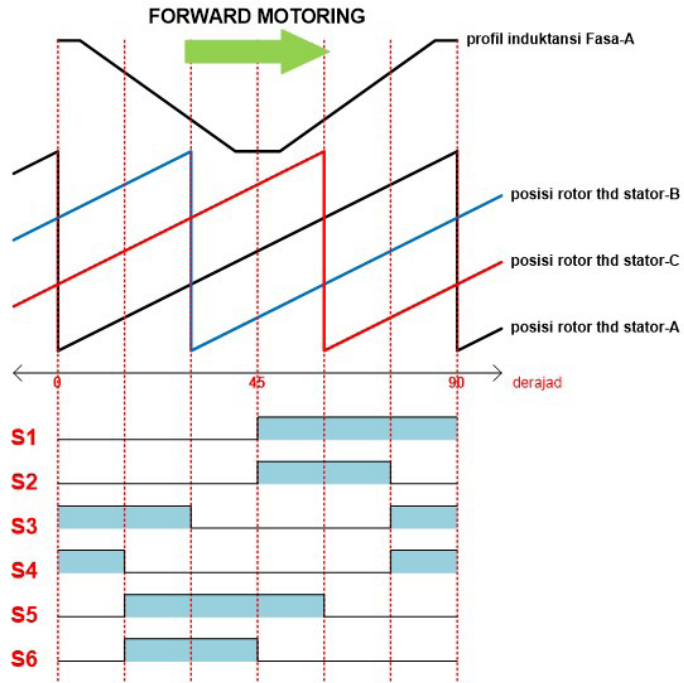
- Dua saklar ON secara bersamaan, kondisi ini membentuk mode magnetizing di mana belitan stator akan terhubung ke tegangan DC sumber dan arus stator akan naik.
- Satu saklar ON dan satu saklar OFF, kondisi ini akan membentuk mode freewheeling di mana arus belitan stator akan turun secara perlahan.
- Dua saklar OFF secara bersamaan, kondisi ini akan membentuk mode demagnetizing di mana akan mengakibatkan arus stator turun secara drastis karena belitan stator terhubung ke sumber DC dengan polaritas terbalik.



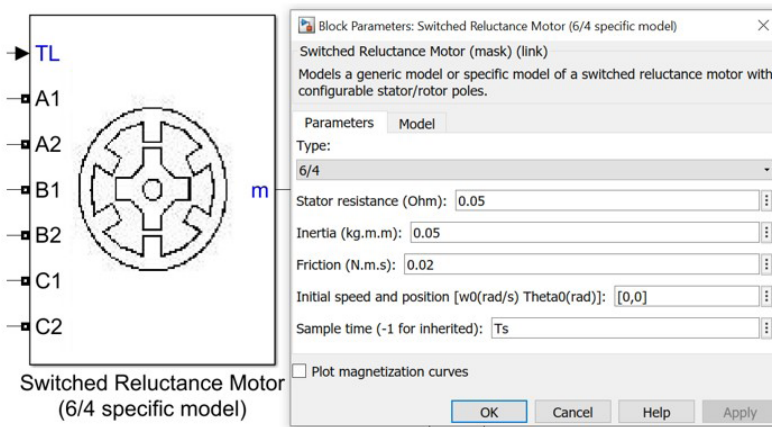
*Gambar-8.9 Konverter jenis asymmetric tiga fasa sebagai penggerak mesin switched reluctance tipe 6/4 sebagai motor putaran maju*

Pada Gambar-8.10 disajikan profil induktansi motor switched reluctance yang akan dikendalikan, gambar juga dilengkapi dengan posisi rotor terhadap kutub stator ketiga fasanya, tampak belitan stator fasa-B akan mengikuti posisi rotor terhadap fasa-A dan seterusnya untuk fasa-C. pada kendali ini, diinginkan setiap belitan akan membentuk mode magnetizing mulai dari sudut posisi rotor  $45^\circ$  hingga  $75^\circ$ , selanjutnya diikuti mode freewheeling selama  $15^\circ$ . pola pensaklaran ditunjukkan pada Gambar-8.7. Langkah pertama yang dilakukan jika akan dipakai SIMULINK – MATLAB adalah memilih mesin switched reluctance. Pada Gambar-8.11 ditunjukkan model mesin switched reluctance tipe 6/4 (6 kutub stator & 4 kutub rotor) dan nilai parameter tersaji pada gambar tersebut. Karakteristik mesin tersebut tersaji dalam Gambar-8.12.

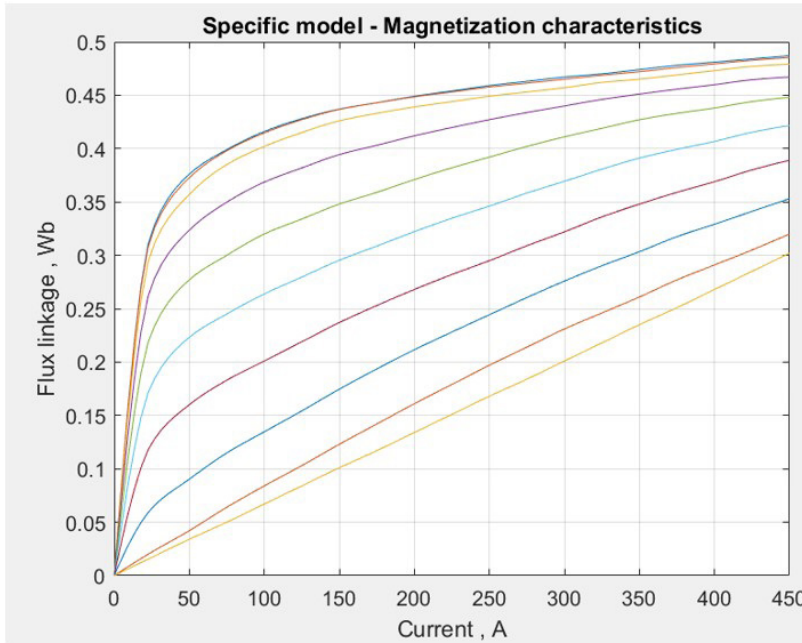




Gambar-8.10 Profil mesin switched reluctance tipe 6/4 sebagai motor putaran maju, sudut rotor terhadap stator masing-masing fasa dan status saklar S1 hingga S6

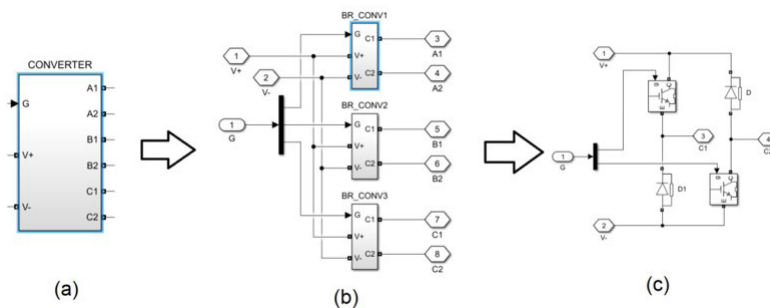


Gambar-8.11 Blok mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK



*Gambar-8.12 Kurva magnetisasi mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK*

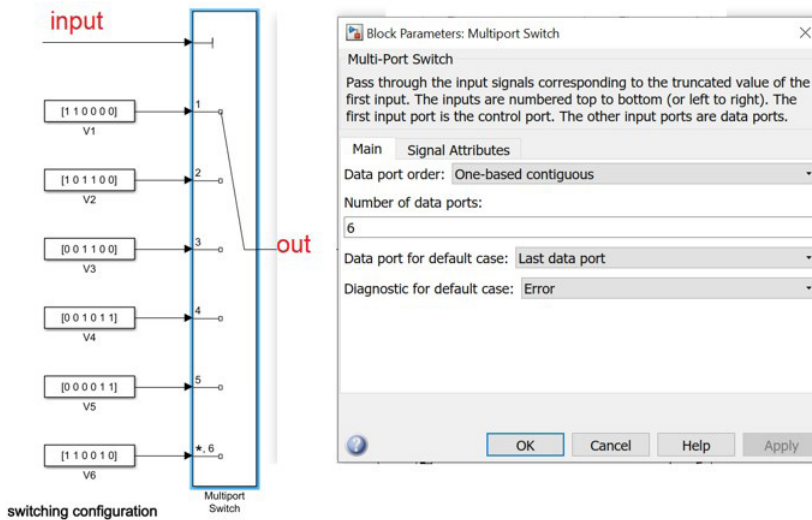
Konverter asymmetric yang digunakan ditunjukkan pada Gambar-8.13, pada bagian (a) ditunjukkan blok konverter asymmetric tiga fasa dengan terminal V+ dan V- merupakan bagian DC-link dari konverter dan terminal G merupakan terminal untuk sinyal kendalinya. Konverter ini di dalamnya terdiri dari tiga buah lengan (Gambar-8.13b), di mana masing-masing lengan terdiri dari dua buah saklar statis dan dua buah dioda (Gambar-8.13c).



*Gambar-8.13 Kurva magnetisasi mesin switched reluctance tipe 6/4 pada SIMULINK*

Dengan mengacu pada Gambar-8.10 sebagai dasar kendali dari masing-masing saklar, maka diperlukan realisasi yang tersedia pada SIMULINK-MATLAB, yaitu Blok Multiport Switch. Blok yang digunakan memiliki satu buah input yang memiliki nilai 1 hingga 6 dan hubungan antara sinyal input dan sinyal output dapat dijabarkan sebagai berikut

- Jika sinyal input bernilai 1 maka sinyal output bernilai [110000]
- Jika sinyal input bernilai 2 maka sinyal output bernilai [101100]
- Jika sinyal input bernilai 3 maka sinyal output bernilai [001100]
- Jika sinyal input bernilai 4 maka sinyal output bernilai [001011]
- Jika sinyal input bernilai 5 maka sinyal output bernilai [000011]
- Jika sinyal input bernilai 6 maka sinyal output bernilai [110010]



Gambar-8.14 Blok Multiport Switch pada SIMULINK

Dengan mengamati Gambar-8.10 tampak bahwa sinyal untuk menyalakan terminal-terminal Gate dari konverter asymmetric harus disesuaikan dengan posisi rotor (sudut rotor), yaitu

- Saklar S1 konduksi pada  $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
- Saklar S2 konduksi pada  $45^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$
- Saklar S3 konduksi pada dan  $75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  dan  $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$
- Saklar S4 konduksi pada dan  $75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  dan  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$
- Saklar S5 konduksi pada  $15^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$
- Saklar S6 konduksi pada  $15^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$

Fungsi interval di atas dapat direalisasikan dengan Blok Fungsi pada SIMULINK seperti ditunjukkan pada Gambar-8.15, keluaran dari blok fungsi ini selanjutnya dijadikan sinyal masukan untuk Blok Multiport Switch. Dengan menggabungkan blok-blok kendali, konverter dan mesin switched reluctance, akan diperoleh rangkaian simulasi pada Gambar-8.16.







```

MATLAB R2018a
HOME PLOTS APPS EDITOR
D: \RYD SIMULINK
Editor - Block: RYD_PTUPT23_SRM_FORWARD_Versi2\KOMUTASI FASA
KOMUTASI FASA
1 function u = KOMUTASI(teta)
2 u = 0;
3 if (teta>=0) & (teta<15)
4     u=3;
5 end;
6 if (teta>=15) & (teta<30)
7     u=4;
8 end;
9 if (teta>=30) & (teta<45)
10    u=5;
11 end;
12 if (teta>=45) & (teta<60)
13    u=6;
14 end;
15 if (teta>=60) & (teta<75)
16    u=1;
17 end;
18 if (teta>=75) & (teta<90)
19    u=2;
20 end;
21
22
23

```

Gambar-8.15 Blok kontrol KOMUTASI FASA untuk mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor

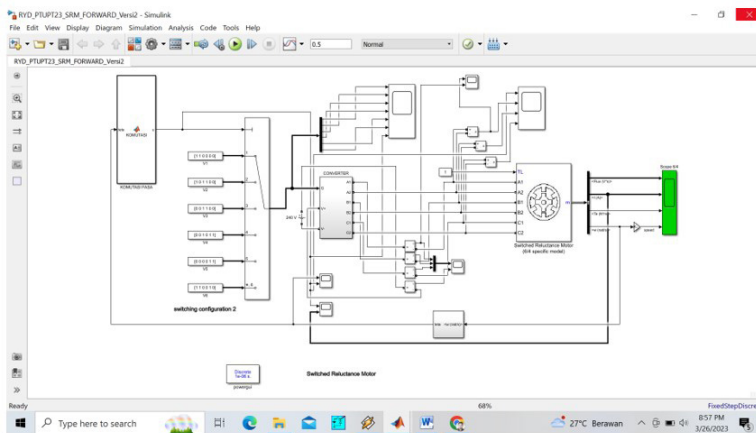
Tabel-8.1 Hubungan antara sinyal keluaran dari Blok Fungsi pada SIMULINK terhadap terminal-terminal Gate untuk operasi motor putaran maju

INPUT	OUTPUT					
	GATE-1	GATE-2	GATE-3	GATE-4	GATE-5	GATE-6
1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0
3	0	0	1	1	0	0
4	0	0	1	0	1	1
5	0	0	0	0	1	1
6	1	1	0	0	1	0



*Tabel-8.2 Pensaklaran pada konverter asymmetric terhadap posisi rotor untuk operasi motor putaran maju*

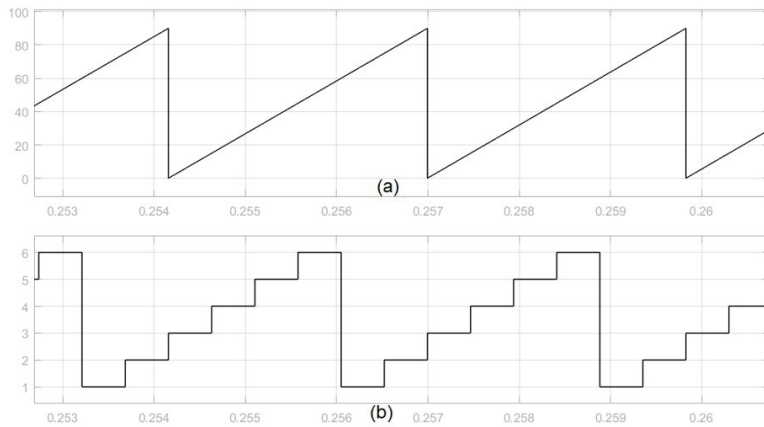
	posisi rotor (derajad)					
	(3)0-15	(4)15-30	(5)30-45	(6)45-60	(1)60-75	(2)75-90
S1				ON	ON	ON
S2				ON	ON	
S3	ON	ON				ON
S4	ON					ON
S5		ON	ON	ON		
S6		ON	ON			



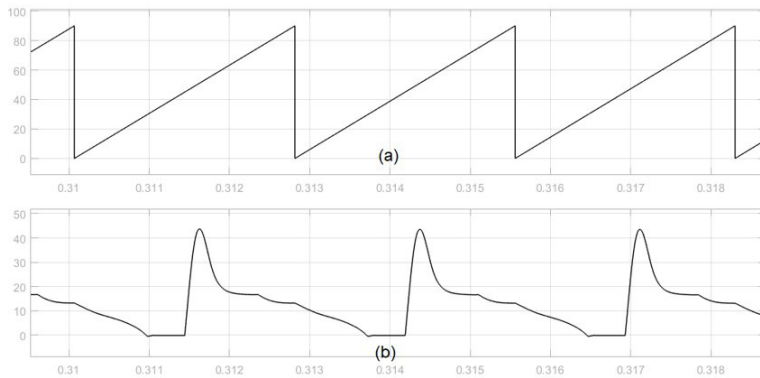
*Gambar-8.16 Rangkaian untuk simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK*

Mengacu rangkaian pada Gambar-8.16, simulasi dengan menggunakan perangkat lunak SIMULINK-MATLAB dilakukan untuk mengetahui kinerja mesin switched reluctance yang dioperasikan sebagai motor. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar-8.17 hingga Gambar-8.22. Tampak pada Gambar-8.17, posisi sudut rotor akan meningkat dari  $0^\circ$  menuju  $90^\circ$  dan berulang, ini menandakan arah maju. Pada bagian di bawahnya merupakan sinyal keluaran dari komutasi fasa, nilainya naik dari 1, 2 hingga 6 dan berulang kembali. Gambar-8.18 menunjukkan saat mode magnetizing, arus akan naik secara signifikan dan turun lagi pada mode freewheeling dan/atau demagnetizing. Melalui Gambar-8.19, dapat dibedakan mode-mode tersebut, tegangan fasa bernilai positif menunjukkan mode operasi magnetizing, tegangan fasa sebesar nol menandakan mode operasi freewheeling dan tegangan fasa negatif menunjukkan mode operasi demagnetizing. Pada Gambar-8.20 dan Gambar-8.21 ditunjukkan hubungan arus dan tegangan untuk fasa-A, fasa-B dan fasa-C. arah putaran maju (forward motoring) ditandai dengan kecepatan yang bernilai positif (Gambar-8.22).

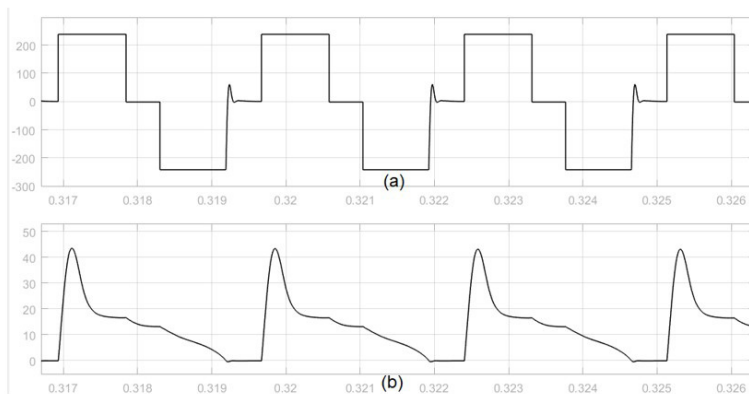




**Gambar-8.17** Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi sudut rotor (b) sinyal keluaran Blok KOMUTASI FASA

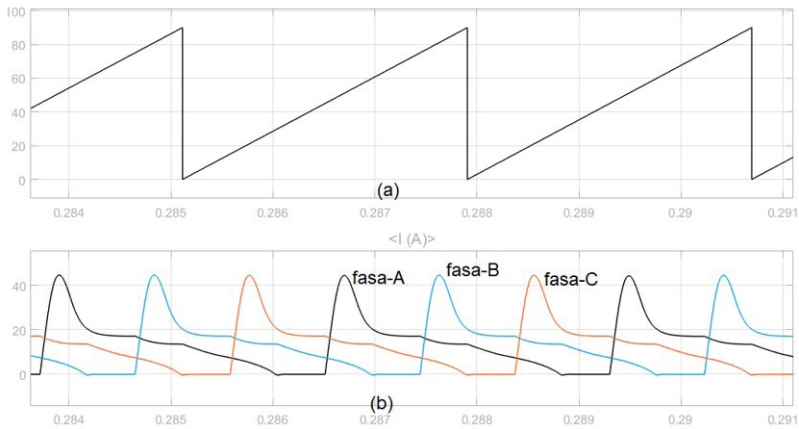


**Gambar-8.18** Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi sudut rotor (b) arus fasa

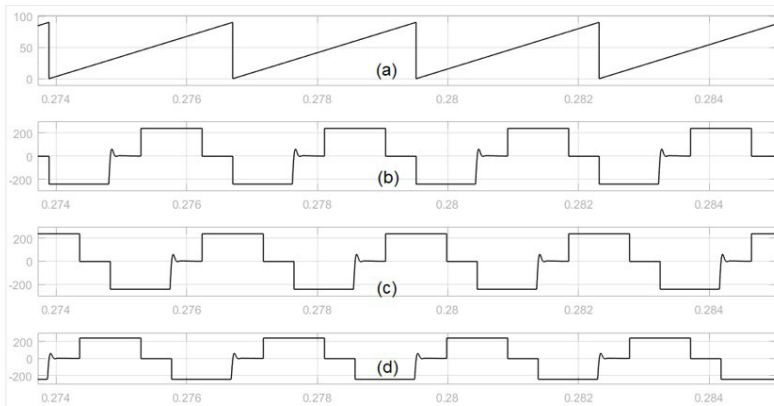


**Gambar-8.19** Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) tegangan fasa (b) arus fasa

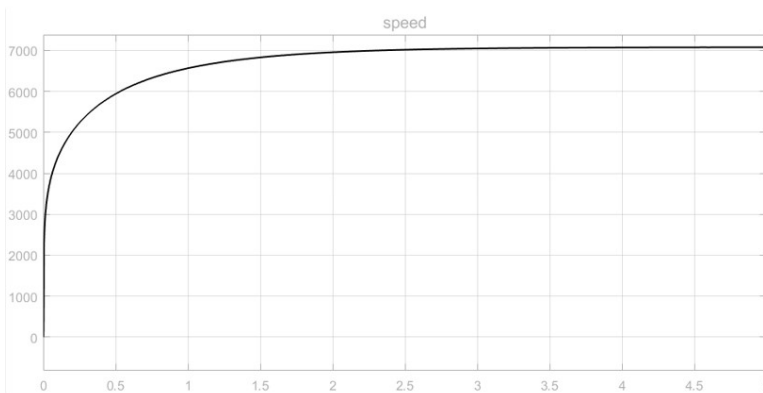




**Gambar-8.20** Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi rotor terhadap stator fasa-A (b) arus-arus fasa



**Gambar-8.21** Hasil simulasi mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK (a) posisi rotor terhadap stator fasa-A (b) tegangan fasa-A (c) tegangan fasa-B (d) tegangan fasa-C



**Gambar-8.22** Hasil simulasi kecepatan mesin switched reluctance dalam operasi sebagai motor arah maju (forward) pada SIMULINK



## Daftar Pustaka

1. M. Lulhe and T. N. Date, (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)
2. R. P. Kumar and D. Susitra, (2016). A SRM Drive based Hybrid Electric Vehicle with Reduced Switch Converter, 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)
3. H. Cheng, H. Chen, S. Xu and S. Yang, (2017). Four quadrant sensorless control in switched reluctance machine drive using pulse injection based on special flux linkage curves, IET Electric Power Applications, Vol.11 , Issue. 9 , pp. 1566 - 1574 2017
4. R. Mikail, I. Husain, Y. Sozer, M. Islam and T. Sebastian, (2015). Four-Quadrant Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Machine through Current Profiling with Mitigation of Rotor Eccentricity Problem and Sensor Errors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.51 , Issue.3 , pp. 2097 – 2104, May-June 2015
5. M. Borujeni, A. Rashidi and S. M. S. Nejad, (2015). Optimal four quadrant speed control of switched reluctance motor with torque ripple reduction based on EM-MOPSO, The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)
6. H. Cheng, Z. Wang, S. Yang, J. Huang and X. Ge, “An Integrated SRM Powertrain Topology for Plug-In Hybrid Electric Vehicles With Multiple Driving and Onboard Charging Capabilities”, IEEE Transactions on Transportation Electrification , vol. 6(2), pp. 578 – 591, June 2020
7. K. Tiwari and R. Saxena, “Speed Control of 8/6 Switched Reluctance Motor for Light Electric Vehicle”, 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2019
8. Q. Sun, J. Wu, C. Gan, J. Si, J. Guo and Y. Hu, “Cascaded Multiport Converter for SRM-Based Hybrid Electrical Vehicle Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34(12), pp. 11940 – 11951, Dec 2019



9. K. Aiso and K. Akatsu, "High Speed SRM Using Vector Control for Electric Vehicle", CES Transactions on Electrical Machines and Systems , vol. 4(1), pp. 61-18, March 2020
10. X. Ai-de, K. He and Y. Cao., "Torque Ripple Reduction of SRM Using Optimized Voltage Vector in DTC", 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Oct 2016
11. X. Ai-de, W. Zang and P. Ren, "Comparison of Torque Ripple Reduction for Switched Reluctance Motor Based on DTC and DITC", 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), May-June 2018
12. N. Yan, X. Cao and Z. Deng, "Direct Torque Control for Switched Reluctance Motor to Obtain High Torque-Ampere Ratio", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66(7), pp. 5144 – 5152, July 2019
13. W. Peng, J. Gyselinck, J. W. Ahn and D. H. Lee, "Torque Sharing Function Control of Switched Reluctance Machines with Reduced Current Sensors", CES Transactions on Electrical Machine and Systems , vol. 2(4), pp. 355 – 362, Dec 2018
14. H. Li, B. Bilgin and A. Emadi, "An Improved Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Machines", IEEE Transactions on Power Electronics , vol. 34(2), pp. 1635 - 1644, Feb 2019
15. Y. Wei, M. Qishuang, Z. Poming and G. Yangyang, "Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Using a Novel Torque Sharing Function", 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), Oct 2016
16. S. Kurian and G. K. Nisha, "Torque Ripple Minimization of SRM Using Torque Sharing Function And Hysteresis Current Controller", 2015 International Conference on Control, Communication & Computing India (ICCC), Nov 2015



# Biodata Penulis



**Penulis** lahir di Semarang tahun 1967. Setelah tamat dari SMA Negeri 3 Semarang, melanjutkan ke Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (UNDIP) dan lulus sebagai Insinyur tahun 1991. Selanjutnya bekerja pada PT KGD Indonesia Inc sebagai Senior Technical Expert (STE), sejak tahun 1992 mejadi tenaga pengajar di Universitas Katolik Soegijapranata Semarang hingga sekarang. Memperoleh gelar Magister Teknik dalam bidang Konversi Energi dan Elektronika Daya dari Institut Teknologi Bandung (ITB) tahun 1997. Kemudian aktif lagi mengajar dan melakukan penelitian. Penulis mendapat kesempatan melanjutkan studi S3 di Institut Teknologi Bandung, selama masa studi juga memperoleh bea siswa dari ASEM DUO-FRANCE untuk melaksanakan penelitian (PhD Partial Research) di Institute Nationale Polytechnique de Toulouse (INPT) Perancis.

**Dr. Slamet Riyadi** juga aktif dalam menulis publikasi ilmiah dan diktat kuliah, menjadi pembicara, mengikuti seminar serta melakukan penelitian. Beberapa penelitian kompetisi telah didapatkan, antara lain

- PhD Partial Research dari ASEM DUO-FRANCE
- RISTEK dari KNRT
- Hibah Bersaing dari DIKTI
- Dosen Muda dari DIKTI
- Penelitian Dasar
- RUD dari Balitbang Prov. Jateng
- DIKNAS Prov. Jateng
- APTIK
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi



Dewasa ini topik penelitian yang menjadi fokus adalah kualitas daya listrik terkait harmonisa, tapis daya aktif, PWM Rectifier, sumber arus terkendali, photovoltaic (PV), PV-Grid Connected System, Electric Drives

e-mail :

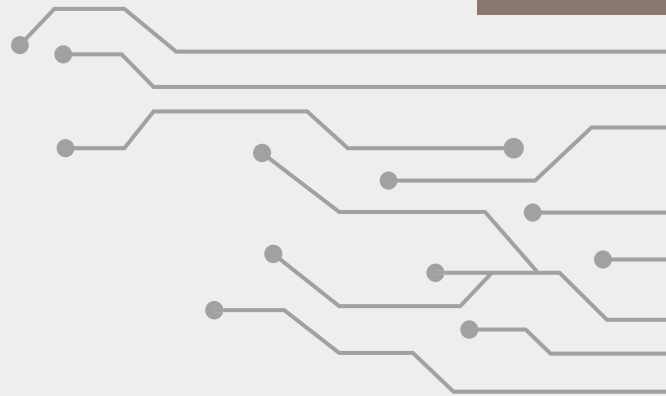
[riyadi@unika.ac.id](mailto:riyadi@unika.ac.id);

[s\\_riyadi672003@yahoo.com](mailto:s_riyadi672003@yahoo.com);

[sriyadi7167@gmail.com](mailto:sriyadi7167@gmail.com)







ISBN 978-623-5997-45-2 (PDF)



9 786235 997452

© Universitas Katolik Soegijapranata 2023