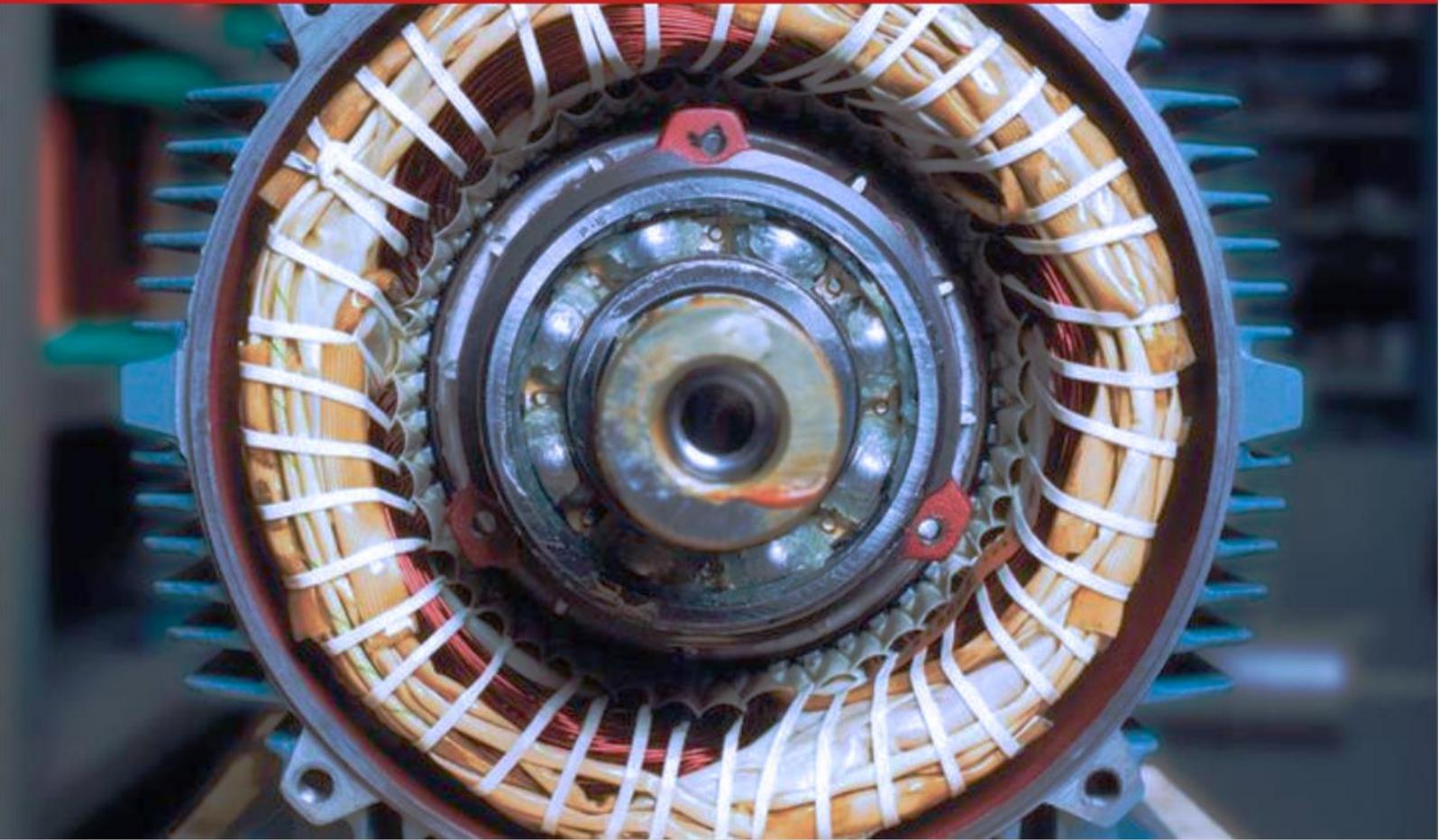


KONVERTER DAYA UNTUK KENDALI **MOTOR LISTRIK**

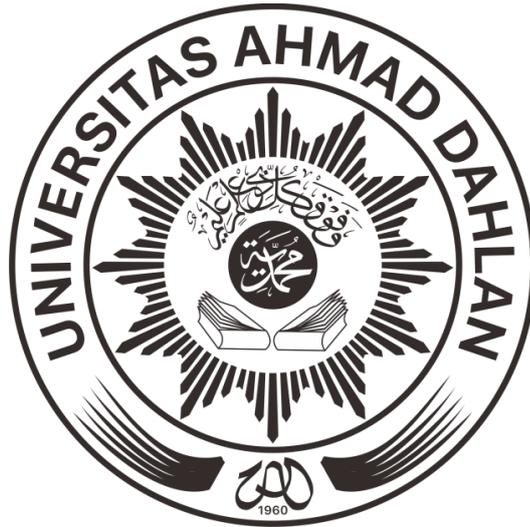
*bahan ajar untuk mata kuliah kendali motor

Tole Sutikno, Ph.D



Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Ahmad Dahlan
2016

Diktat I Kuliah Kendali Motor:
Konverter Daya untuk Kendali Motor Listrik



Tole Sutikno, Ph.D.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

2016/2017

Kata Pengantar

Puji syukur kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga diktat/bahan ajar “**Konverter Daya untuk Kendali Motor Listrik**” ini telah diselesaikan. Diktat ini disusun sebagai buku ajar mahasiswa Strata 1 maupun Diploma jurusan Teknik Elektro.

Diktat ini disusun berdasarkan referensi dari berbagai buku, hasil penelitian dan data dari industri yang berkaitan. Diktat ini disusun menjadi 2 Bab yang membahas tentang motor listrik dan konverter daya untuk kendali motor. Bahan ajar ini juga dilengkapi soal latihan untuk mengasah kemampuan mahasiswa terkait bahasan-bahasan yang telah dipelajari.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan diktat ini, untuk itu kami sangat mengharapkan kritik dan saran terhadap penyempurnaan diktat ini. Semoga dengan adanya diktat ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi pembaca.

01 Januari 2017

Penulis

Tole Sutikno

Daftar Isi

Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	ii
1_ MOTOR LISTRIK	1
1.1 PENGANTAR	1
1.2 PRODUKSI ROTASI	2
Medan Magnet dan Fluks Magnet	3
Kerapatan Fluks Magnetik	4
Gaya Pada Konduktor	5
1.3 RANGKAIAN MAGNETIK	7
Gaya Magnetomotive (MMF)	9
Analogi rangkaian listrik	9
Celah udara	11
Reluktansi dan kerapatan fluks pada celah udara	12
Saturasi	14
Rangkaian magnetik pada motor	15
1.4 PRODUKSI TORSI	16
Besaran torsi	18
Keindahan slotting	18
1.5 BEBAN KHUSUS DAN KELUARAN KHUSUS	20
Beban khusus	20
Torsi dan Volume motor	22
Keluaran daya spesifik-pentingnya kecepatan	23
1.6 KONVERSI ENERGI – GERAKAN GGL	25
Dasar-dasar Motor: kondisi stasioner	25
Hubungan torsi dengan konduktor yang bergerak dengan kecepatan konstan	27
1.7 RANGKAIAN EKUIVALEN	29
Kondisi Motor	31

Perilaku Motor Tanpa Beban Mekanis	31
Perilaku Motor Dengan Beban Mekanis	33
Besaran V dan E relatif dan efisiensi	35
Analisis motor primitif– kesimpulan	36
1.8 PROPERTI UMUM PADA MOTOR LISTRIK	37
Suhu dan pendinginan pengoperasian	37
Torsi per satuan volume	38
Daya per satuan volume-pentingnya kecepatan	39
Efek ukuran-torsi dan efisiensi spesifik	39
Efisiensi dan kecepatan	39
Nilai tegangan	39
Overload jangka pendek	39
Soal Latihan	40
2_ KONVERTER ELEKTRONIKA DAYA UNTUK KENDALI MOTOR	42
2.1 PENGANTAR	42
Pengaturan Umum Pengendali	43
2.2 KENDALI TEGANGAN-KELUARAN DC DARI CATU DAYA DC	44
Kendali Penyaklaran	45
Transistor Chopper	46
Chopper dengan proteksi beban induktif-tegangan berlebih	48
Fitur dari konverter elektronika daya	50
2.3 DC DARI AC-RESTIFIKASI YANG TERKENDALI	51
Tiristor	51
Penyearah pulsa tunggal (<i>Single-pulse rectifier</i>)	52
Konverter fasa tunggal terkendali penuh-kendali tegangan keluaran	53
Beban resistif	54
Beban induktif (motor)	55
Konverter 3 fasa terkendali penuh	57
Rentang tegangan keluaran	59

Rangkaian penyalaaan	59
2.4 AC DARI DC: INVERSI SP-SP	59
Inverter satu fasa	60
Kendali tegangan keluaran	61
PWM sinusoidal.....	63
Inverter 3 fasa	63
2.5 PERANGKAT SWITCHING INVERTER.....	66
<i>Bipolar junction transistor (BJT)</i>	<i>66</i>
<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET).....</i>	<i>67</i>
<i>Insulated gate bipolar transistor (IGBT).....</i>	<i>68</i>
<i>Gate turn-off thyristor (GTO).....</i>	<i>68</i>
Bentuk Gelombang Konverter dan Gangguan Akustik	68
2.6 PENDINGINAN PERANGKAT SAKLAR DAYA.....	69
Resistensi termal	69
Susunan unit pendingin dan pendinginan udara	70
Kipas pendingin	72
Soal Latihan.....	72
REFERENSI.....	75

1 MOTOR LISTRIK

1.1 PENGANTAR

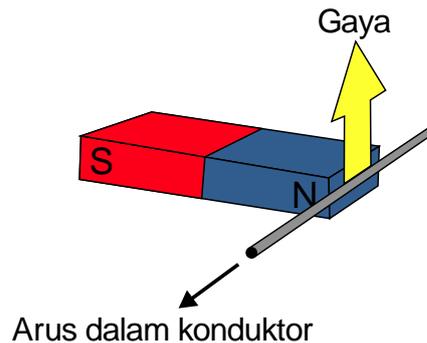
Motor listrik telah menjadi bagian dari kehidupan sehari-hari kita, sehingga kita jarang sekali memikirkan bagaimana cara kerjanya. Contohnya ketika kita menghidupkan bor listrik, kita pasti menginginkan alat tersebut beroperasi dengan baik, hingga mencapai kecepatan yang diinginkan, namun kita tidak pernah mempertanyakan bagaimana ia tahu kecepatan yang harus dijalankan, atau bagaimana bisa energi yang cukup diambil dari catu daya untuk mempercepatnya, kemudian pada akhirnya daya ditarik turun kembali ke tingkat yang sangat rendah. Ketika kita mengoperasikan bor listrik untuk bekerja, bor listrik menarik lebih banyak daya, tetapi kemudian seketika kita juga menginginkan torsi yang diambil dari listrik berkurang secara otomatis tanpa intervensi dari luar.

Motor sederhananya terdiri tidak lebih dari susunan belitan tembaga dan laminasi baja, jelas memerlukan konverter energi yang cerdas dan perlu pertimbangan yang serius dalam penggunaan konverter. Dengan mendapatkan pemahaman dasar tentang cara kerja motor, kita diharapkan bisa menghargai potensi dan keterbatasannya, serta dapat melihat bagaimana kinerjanya yang sudah luar biasa, namun kinerjanya masih dapat ditingkatkan lagi dengan penambahan kendali elektronik eksternal.

Bagian ini membahas mekanisme dasar dari operasi motor, sehingga pembaca yang sudah terbiasa dengan hal-hal seperti fluks magnet, rangkaian magnetik, listrik, torsi, dan pergerakan GGL (e.m.f) mungkin dapat menyiasati sebagian besar dari hal tersebut. Namun, dalam perjalanan diskusi, beberapa prinsip dan pedoman umum yang sangat penting muncul. Ini berlaku untuk semua jenis motor. Pengalaman menunjukkan bahwa siapapun yang memiliki pemahaman yang baik tentang prinsip-prinsip dasar ini, nantinya akan dibekali pengetahuan yang baik untuk menimbang pro dan kontra dari berbagai jenis motor, sehingga semua pembaca diharapkan untuk menyerapnya lebih dalam sebelum menangani bagian lain yang lebih sulit dari materi ini.

1.2 PRODUKSI ROTASI

Hampir semua motor mengeksploitasi gaya yang diberikan pada konduktor pengangkut arus yang ditempatkan pada bagian medan magnet. Gaya dapat ditunjukkan dengan menempatkan batang magnet di dekat kawat yang membawa arus (Gambar 1.1), tetapi siapa pun yang mencoba eksperimen ini mungkin akan kecewa saat menemukan betapa lemahnya gaya yang timbul, dan pasti akan bertanya-tanya bagaimana efek yang tidak menjanjikan seperti itu dapat digunakan untuk membuat motor yang efektif.



Gambar 1.1 Gaya mekanik yang dihasilkan pada kabel pembawa arus dalam medan magnet

Kita akan melihat bahwa untuk memanfaatkan mekanisme tersebut secara maksimal, kita perlu mengatur medan magnet yang sangat kuat, dan membuatnya berinteraksi dengan banyak konduktor, masing-masing membawa arus sebanyak mungkin. Kita juga akan melihat bahwa, meskipun medan magnet (atau 'eksitasi') sangat penting untuk kerja motor, namun hal tersebut hanya bertindak sebagai katalis, dan semua daya keluaran mekanik berasal dari catu listrik ke konduktor di mana gaya dikembangkan. Akan muncul dalam beberapa motor bagian-bagian mesin yang bertanggung jawab untuk eksitasi dan untuk fungsi konversi energi jelas berbeda. Pada motor DC misalnya, eksitasi disediakan baik oleh magnet permanen atau oleh belitan medan magnet yang melilit kutub bidang proyeksi yang jelas pada bagian stasioner, sedangkan konduktor di mana gaya dikembangkan adalah pada rotor dan dicatu dengan arus melalui sikat geser. Namun, pada banyak motor, tidak ada perbedaan fisik yang jelas antara bagian 'eksitasi' dan bagian 'konversi energi' dari mesin, serta belitan stasioner tunggal berfungsi melayani kedua tujuan. Namun demikian, kita akan menemukan bahwa mengidentifikasi dan memisahkan fungsi eksitasi dan konversi energi selalu dapat membantu dalam memahami bagaimana semua jenis motor dapat beroperasi.

Kembali ke masalah gaya pada satu konduktor, pertama kita akan melihat apa yang menentukan besar dan arah gaya, sebelum kita beralih ke cara mekanisme dieksploitasi untuk menghasilkan rotasi. Konsep rangkaian magnetik harus dieksplorasi, karena ini adalah inti untuk memahami mengapa motor memiliki pola tersendiri. Pengantar singkat untuk medan magnet, fluks magnetik, dan

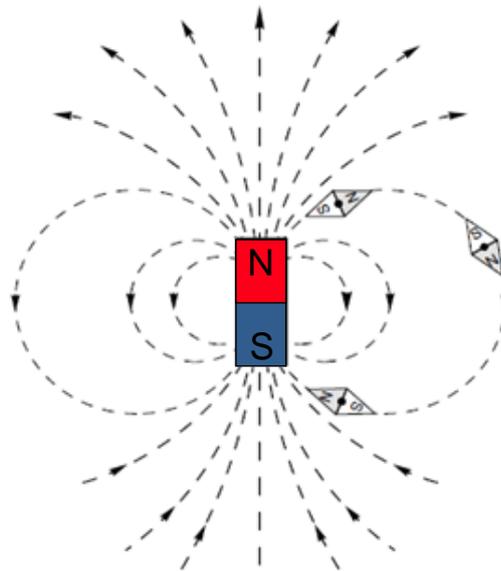
kerapatan fluks disertakan sebelumnya bagi pembaca yang tidak terbiasa dengan konsep-konsep tersebut.

Medan Magnet dan Fluks Magnet

Ketika konduktor pembawa arus ditempatkan dalam medan magnet, maka ia akan mendapatkan gaya. Eksperimen menunjukkan bahwa besarnya gaya bergantung pada arus yang terdapat pada kawat dan torsi medan magnet, serta gaya paling besar didapatkan ketika medan magnet tegak lurus terhadap konduktor.

Pada *set-up* yang ditunjukkan pada Gambar 1.1, sumber medan magnet adalah batang magnet yang menghasilkan medan magnet seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2.

Gagasan tentang 'medan magnet' yang mengelilingi magnet adalah ide abstrak yang dapat membantu kita memahami fenomena magnetisme, gagasan ini tidak hanya memberi kita cara bergambar yang sesuai dalam mendeskripsikan efek arah, tetapi juga memungkinkan kita untuk mengukur 'torsi' magnetik, oleh karenanya gagasan ini memungkinkan kita untuk memprediksi berbagai efek yang dihasilkannya.



Gambar 1.2 Garis fluks magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen

Namun, ketika kita meletakkan jarum kompas (yang merupakan magnet permanen) di sekitar medan, kita akan menemukan bahwa jarum itu sejajar seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2. Di bagian atas gambar (ujung S dari kompas berbentuk berlian menempel paling dekat ke kutub N magnet), sedangkan di bagian bawah gambar, ujung N kompas mencari sisi S dari magnet. Ini menunjukkan

bahwa ada arah yang terkait dengan garis fluks, seperti yang ditunjukkan oleh panah pada garis fluks, yang secara konvensional diambil secara positif dari kutub N ke kutub S pada batang magnet.

Sketsa pada Gambar 1.2 menunjukkan bahwa ada 'sumber' di dekat bagian atas batang magnet, dari mana garis fluks berasal sebelum membuat jalan ke 'sink' yang sesuai di bagian bawah batang magnet. Namun, jika kita melihat garis fluks di dalam magnet, kita akan menemukan bahwa hal tersebut berlangsung secara kontinu, tanpa 'awal' ataupun 'akhir'. (Pada Gambar 1.2, garis-garis fluks internal telah dihilangkan untuk kejelasan, tetapi pola medan yang sangat mirip dihasilkan oleh kumparan melingkar dari kawat yang membawa huruf D. Lihat Gambar 1.6 di mana kontinuitas garis-garis fluks lebih jelas). Garis fluks magnetik selalu membentuk jalur tertutup, seperti yang akan kita lihat ketika kita mengamati 'rangkain magnetik', dan menggambarinya secara sejajar dengan rangkain listrik, dimana arus juga merupakan kuantitas yang kontinu.

Kerapatan Fluks Magnetik

Seiring dengan penunjukan arah, plot fluks magnetik juga menyampaikan informasi tentang intensitas dari medan magnet. Untuk mencapai hal ini, kami memperkenalkan gagasan bahwa di antara setiap pasangan garis fluks (dan untuk kedalaman tertentu di dalam paper) ada 'kuantitas' fluks magnet yang sama. Beberapa orang tidak memiliki kesulitan dengan konsep seperti itu, sementara yang lain menemukan bahwa gagasan untuk mengukur sesuatu yang begitu abstrak merupakan tantangan intelektual yang serius. Tetapi apakah pendekatannya tampak jelas atau tidak, tidak dapat dipungkiri bahwa hal praktis dari mengukur hal-hal misterius yang kita sebut fluks magnet, hal itu membawa kita ke sebelah ide yang sangat penting dari kerapatan fluks magnetik (B).

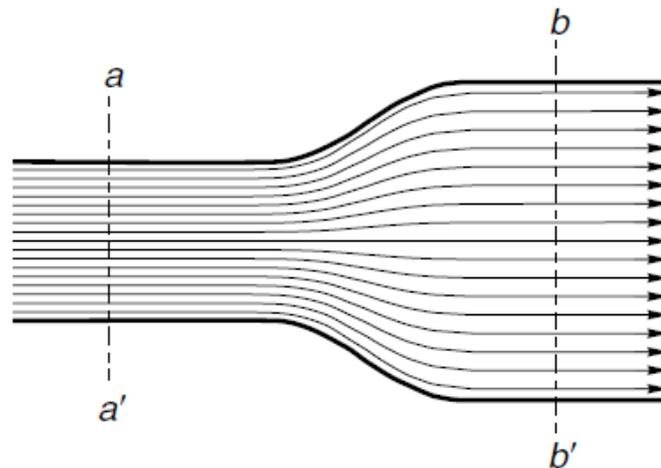
Ketika garis fluks berdekatan, 'tabung' fluks terjepit ke dalam ruang yang lebih kecil, sedangkan ketika garis-garis fluks terpisah jauh, tabung fluks yang sama akan memiliki lebih banyak ruang. Kerapatan fluks (B) hanyalah fluks dalam 'tabung' (Φ) yang dibagi dengan luas penampang (A) dari tabung, seperti:

$$B = \Phi/A \quad (1.1)$$

Kerapatan fluks adalah besaran vektor, oleh karenanya sering ditulis dalam huruf **tebal**: besarnya diberikan oleh persamaan (1.1), dan arahnya adalah garis fluks yang berlaku di setiap titik. Di dekat bagian atas magnet pada Gambar 1.2 misalnya, kerapatan fluks akan besar (karena fluks terjepit ke area kecil), dan mengarah ke atas, sedangkan di garis equator dan jauh dari batang magnet, kerapatan fluks akan menjadi kecil dan mengarah ke bawah.

Akan terlihat kemudian bahwa untuk menciptakan kerapatan fluks yang tinggi pada motor, fluks menghabiskan sebagian besar masa aktifnya di dalam 'rangkain magnetik' yang terbuat dari besi atau baja, dimana garis fluks tersebar secara seragam untuk mengambil keuntungan penuh dari area yang

tersedia. Dalam kasus yang ditunjukkan pada Gambar 1.3, misalnya, area penampang di bb' adalah dua kali lipat dari aa' , tetapi fluksnya konstan sehingga kerapatan fluks di bb' adalah setengah dari aa' .



Gambar 1.3 Garis fluks magnetik di bagian dalam magnet besi

Masih dalam konteks menentukan unit untuk kuantitas dan kerapatan fluks. Dalam sistem SI, satuan fluks magnet adalah weber (Wb). Jika satu weber fluks didistribusikan secara seragam di area 1m^2 dan tegak lurus terhadap fluks, maka kerapatan fluks jelas satu weber per meter persegi ($\text{Wb} = \text{m}^2$). Ini adalah satuan kerapatan fluks magnetik sampai sekitar 40 tahun yang lalu, ketika diputuskan bahwa satu weber per meter persegi untuk selanjutnya akan dikenal sebagai satu tesla (T), untuk menghormati Nikola Tesla yang pada umumnya dikenal sebagai pencipta motor induksi. Meluasnya penggunaan simbol B (diukur dalam tesla) pada tahap desain semua jenis peralatan elektromagnetik, berarti bahwa kita terus-menerus diingatkan akan pentingnya tesla; tetapi pada saat yang sama kita harus mengakui bahwa unit yang sudah ketinggalan zaman tersebut memiliki keuntungan dari sisi penyampaian secara langsung apa itu kerapatan fluks, yaitu fluks yang dibagi berdasarkan area.

Dalam dunia motor listrik, kita tidak mungkin menghadapi lebih dari beberapa miliwebers (mWb) fluks, dan batang magnet kecil mungkin hanya akan menghasilkan beberapa microwebers (μWb). Di sisi lain, nilai kerapatan fluks biasanya sekitar 1 T di sebagian besar motor, yang merupakan refleksi dari fakta bahwa meskipun jumlah fluks kecil, tetapi ia juga tetap tersebar di area yang kecil tersebut.

Gaya Pada Konduktor

Kita sekarang kembali ke produksi gaya pada kabel pembawa arus yang ditempatkan di medan magnet, seperti yang diungkapkan oleh pengaturan yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.

Arah gaya yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. berada pada sudut kanan terhadap kerapatan fluks arus dan magnet. Dengan kerapatan Fluks horizontal dan arah ke kanan, serta arus mengalir keluar

dari kertas, gaya akan secara vertikal ke atas. Jika medan atau arus dibalik, maka gaya akan bekerja ke bawah, dan jika keduanya terbalik, maka gaya akan tetap ke atas.

Berdasarkan percobaan, kami menemukan bahwa jika kita menggandakan kerapatan arus atau fluks, maka kita juga akan menggandakan gaya, sementara dengan menggandakan keduanya menyebabkan gaya akan meningkat empat kali lipat. Tetapi bagaimana dengan mengukur gaya? Kita perlu mengekspresikan gaya dalam hal perkalian arus dan kerapatan fluks magnetik, dan hal ini ternyata sangat mudah ketika kita bekerja dalam unit SI.

Gaya pada kawat dengan panjang l , membawa arus I dan terpapar dengan kerapatan fluks magnetik seragam B sepanjang panjangnya diberikan oleh ekspresi sederhana berikut;

$$F = BIl \text{-(1.2)}$$

Dimana, F dalam newton, B dalam tesla, I dalam ampere, dan l dalam meter.

Ini adalah formula sederhana yang menyenangkan, dan mungkin mengejutkan bagi beberapa pembaca bahwa tidak ada konstanta proporsionalitas yang terlibat dalam persamaan 1.2. Kesederhanaan bukanlah suatu kebetulan, tetapi berasal dari fakta bahwa satuan arus (ampere) sebenarnya ditentukan dalam hal torsi.

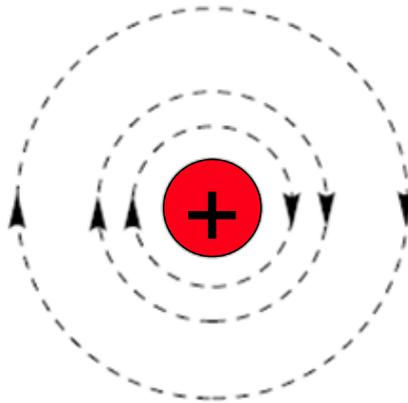
Secara ketat, persamaan 1.2 hanya berlaku ketika arus tegak lurus terhadap medan. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, gaya pada konduktor akan berkurang; dan dalam kasus ekstrim dimana arus berada pada arah yang sama dengan medan, gaya akan turun ke nol. Namun, setiap perancang motor yang bijak pasti tahu bahwa untuk mendapatkan hasil yang terbaik, medan magnet itu harus tegak lurus terhadap konduktor, sehingga aman untuk mengasumsikan bahwa dalam diskusi berikutnya, \mathbf{B} dan \mathbf{I} selalu tegak lurus. Dalam diktat ini, akan diasumsikan bahwa kerapatan fluks dan arus saling tegak lurus, dan inilah sebabnya, walaupun \mathbf{B} adalah kuantitas vektor (dan biasanya dilambangkan dengan tipe tebal), kita dapat menghilangkan notasi tebal karena arahnya implisit dan kami hanya tertarik pada besarnya saja.

Alasan mengapa gaya yang terdeteksi sangat rendah dalam percobaan dengan batang magnet yang diungkapkan oleh persamaan 1.2. Untuk mendapatkan gaya yang besar, kita harus memiliki kerapatan Fluks yang tinggi dan banyak arus. Kerapatan fluks pada ujung batang magnet rendah, mungkin hanya 0,1 tesla, sehingga kawat yang membawa 1 amp akan mengalami gaya hanya 0,1 N/m (sekitar 100 gm/wt). Karena kerapatan Fluks akan diperkirakan sekitar 1 cm di permukaan ujung magnet, maka gaya total pada kawat akan hanya 1 gram. Ini hampir tidak terdeteksi dan terlalu rendah untuk digunakan pada motor yang layak. Jadi bagaimana cara mendapatkan lebih banyak daya?

Langkah pertama adalah kita harus mendapatkan kerapatan Fluks setinggi mungkin. Ini dapat dicapai dengan merancang rangkaian magnetik yang 'baik', dan akan dibahas selanjutnya. Kedua, sebanyak mungkin konduktor harus dikemas dalam ruang di mana medan magnet ada, dan masing-masing konduktor harus membawa arus sebanyak mungkin tanpa memanaskan hingga mencapai suhu yang berbahaya. Dengan cara ini, torsi yang mengesankan dapat diperoleh dari perangkat yang hanya berukuran sedang.

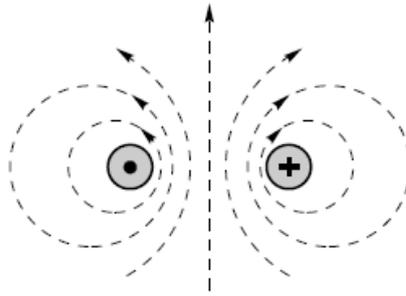
1.3 RANGKAIAN MAGNETIK

Sejauh ini kita telah mengasumsikan bahwa sumber medan magnet adalah magnet permanen. Ini adalah titik awal yang baik karena kita semua terbiasa dengan magnet. Tetapi di sebagian besar motor, medan magnet yang bekerja diproduksi oleh kumparan kawat pembawa arus, jadi sudah sepantasnya kita meluangkan waktu untuk melihat bagaimana kita mengatur kumparan dan 'rangkai magnet' besi yang terkait untuk menghasilkan magnet dengan medan yang kemudian berinteraksi dengan konduktor pembawa arus lainnya untuk menghasilkan gaya dan rotasi.

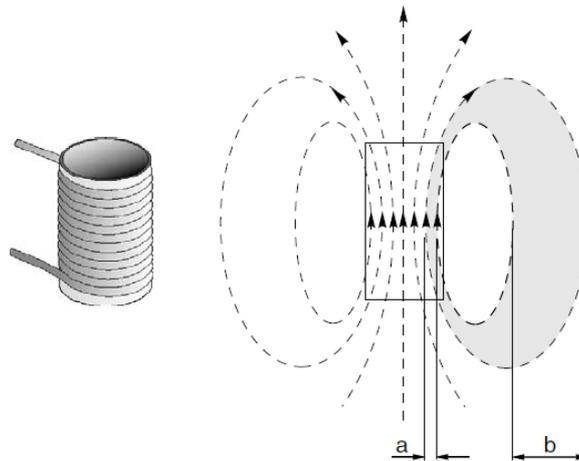


Gambar 1.4. Garis fluks magnetik yang dihasilkan oleh arus pada kawat lurus

Pertama, kita melihat kasus paling sederhana dari medan magnet yang mengelilingi kawat lurus panjang terisolasi yang membawa arus stabil (Gambar 1.4). (Dalam gambar, tanda + menunjukkan bahwa arus mengalir ke dalam kertas, sedangkan titik digunakan untuk menandakan arus keluar dari kertas: simbol-simbol ini mungkin dapat diingat dengan menggambarkan panah atau anak panah, dengan simbol (+) sebagai tampilan belakang dari *fletch*, dan kemudain titik menjadi lebih mendekat.) Garis fluks membentuk lingkaran konsentris dengan kawat, medan terkuat adalah yang paling dekat dengan kawat. Seperti yang mungkin diharapkan, torsi medan pada titik manapun berbanding lurus dengan arus.



Gambar 1.5. Garis fluks magnetik yang dihasilkan oleh arus dalam rangkaian paralel



Gambar 1.6 Koil silinder *multi-turn* dan pola fluks magnet yang dihasilkan oleh arus dalam koil. (untuk lebih jelasnya, garis kumparan ditampilkan di sebelah kanan)

Gambar 1.4 agak dibuat-buat karena arus hanya dapat mengalir dalam rangkaian lengkap, sehingga harus selalu ada jalur balik. Jika kita membayangkan rangkaian paralel 'pergi' dan 'kembali' misalnya, maka medan dapat diperoleh dengan melapiskan medan magnet yang dihasilkan oleh arus positif di sisi pergi dengan medan yang dihasilkan oleh arus negatif di sisi kembali, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5.

Kami mencatat bagaimana medan meningkat di wilayah antara konduktor, dan berkurang di daerah luar konduktor. Meskipun Gambar 1.5 hanya berlaku untuk sepasang konduktor lurus yang panjang, mungkin tidak akan mengejutkan untuk mengetahui bahwa medan yang dihasilkan oleh satu putaran kawat berbentuk persegi panjang, persegi atau bulat sangat mirip dengan yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Hal ini memungkinkan kami untuk membuat gambar medan yang akan diproduksi di udara, dengan jenis belitan yang digunakan dalam motor yang biasanya memiliki banyak belitan, seperti yang ditunjukkan contohnya pada Gambar 1.6.

Koil ditunjukkan di sebelah kiri dalam gambar 1.6 sedangkan pola fluks yang dihasilkan ditunjukkan di sebelah kanan. Setiap belitan dalam kumparan menghasilkan pola medan magnet yang

berbeda, dan ketika semua komponen medan individual ditumpangkan, kita melihat bahwa medan di dalam kumparan meningkat secara substansial dan jalur fluks yang tertutup sangat mirip dengan batang magnet yang kita lihat sebelumnya. Udara yang mengelilingi sumber-sumber medan menawarkan jalur homogen untuk fluks, sehingga begitu tabung-tabung fluks terlepas dari pengaruh konsentrasi sumber, mereka bebas menyebar ke seluruh ruang di sekitarnya. mengingat bahwa antara setiap pasangan garis fluks ada jumlah fluks yang sama, kita melihat bahwa karena garis fluks menyebar ketika mereka meninggalkan batas kumparan, kerapatan fluks jauh lebih rendah di luar daripada di dalam: misalnya, jika jarak 'b' dikatakan empat kali jarak 'a' kerapatan fluks B_b adalah seperempat dari B_a .

Meskipun kerapatan fluks di dalam koil lebih tinggi daripada di luar koil, kita akan menemukan bahwa kerapatan fluks yang dapat kita capai masih terlalu rendah untuk digunakan di motor. Apa yang dibutuhkan pertama adalah cara meningkatkan kerapatan fluks, kedua adalah cara untuk memekatkan fluks dan mencegahnya menyebar ke ruang di sekitarnya.

Gaya Magnetomotive (MMF)

Salah satu cara yang jelas untuk meningkatkan kerapatan fluks adalah dengan meningkatkan arus dalam koil, atau menambahkan lebih banyak belitan. Kami menemukan bahwa jika kami menggandakan arus, atau jumlah belitan, maka hal tersebut dapat menggandakan fluks total, sehingga dapat menggandakan kerapatan fluks dimanapun.

Kami mengukur kemampuan kumparan untuk menghasilkan fluks dalam hal gaya gerak magnet (MMF). Kumparan MMF hanyalah pengalihan dari jumlah belitan (N) dan arus (I), dan dengan demikian maka dinyatakan dalam ampere-belitan. MMF yang diberikan dapat diperoleh dengan sejumlah besar lilitan kawat tipis yang membawa arus rendah, atau beberapa lilitan kawat tebal yang membawa arus tinggi: sehingga selama produk NI konstan, maka MMF adalah sama. sehingga didapatkan:

$$B = N \times I.$$

Dimana:

B = fluks total,

N = jumlah belitan, dan

I = arus yang melewati kumparan.

Analogi rangkaian listrik

Kita telah melihat bahwa fluks magnet yang diatur sebanding dengan MMF yang mengendalikannya. Ini paralel dengan rangkaian listrik, dimana arus (amp) yang mengalir sebanding dengan GGL (volt) yang mengendalikannya.

Dalam rangkaian listrik, arus dan GGL berhubungan dengan Hukum Ohm, yaitu;

$$\text{Arus} = \text{GGL}/\text{Resistansi} \text{ atau } I = V/R \text{-(1.3)}$$

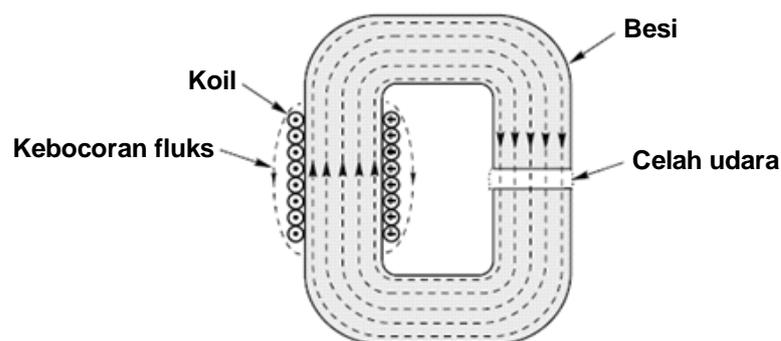
Untuk sumber GGL (volt) yang diberikan, arus tergantung pada resistansi rangkaian, sehingga untuk mendapatkan lebih banyak arus, maka resistansi rangkaian harus dikurangi.

Kita dapat menggunakan 'hukum Ohm magnetik' yang setara dengan memperkenalkan gagasan reluktansi (R). Reluktansi memberikan ukuran seberapa sulit fluks magnet untuk menyelesaikan rangkaianannya, dengan cara yang sama seperti resistensi menunjukkan seberapa besar pertentangan yang terjadi pada arus di rangkaian listrik. Hukum Ohm magnetik adalah:

$$\text{Flux} = \text{MMF}/\text{Reluktansi} \text{ atau } \Phi = \text{NI}/R \text{-(1.4)}$$

Kita bisa melihat dari persamaan 1.4 bahwa untuk meningkatkan fluks untuk MMF yang diberikan, kita perlu mengurangi reluktansi pada rangkaian magnetik. Dalam contoh kasus (Gambar 1.6), ini berarti kita harus mengganti sebanyak mungkin jalur udara (yang merupakan bahan magnetik 'buruk', dan karenanya reluktansi menjadi tinggi) dengan bahan magnetik yang 'baik', dengan demikian hal tersebut akan mengurangi reluktansi dan menghasilkan fluks yang lebih tinggi untuk MMF yang diberikan.

Bahan yang kami pilih adalah baja magnetik berkualitas baik, yang karena alasan historis biasanya disebut 'besi'. Hal ini membawa beberapa manfaat yang sangat baik dan diinginkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Garis fluks di dalam rangkaian magnetik reluktansi rendah dengan celah udara

Pertama, reluktansi lintasan besi jauh lebih sedikit daripada lintasan udara yang telah mereka gantikan, sehingga total fluks yang dihasilkan untuk MMF yang diberikan jauh lebih besar. (Oleh karena itu, jika MMF dan penampang kumparan pada Gambar 1.6 dan 1.7 adalah sama, lebih banyak garis fluks harus ditunjukkan pada Gambar 1.7 daripada pada Gambar 1.6, tetapi untuk lebih jelas angka yang sama ditunjukkan.) Kedua, hampir semua fluks terkurung di dalam besi, bukannya menyebar ke udara di sekitarnya. Karena itu kita dapat membentuk bagian-bagian besi dari rangkaian

magnetik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7 untuk memandu fluks ke manapun ia dibutuhkan. Dan akhirnya, kita melihat bahwa di dalam besi, kerapatan fluks tetap seragam di seluruh penampang, ada begitu sedikit reluctance sehingga tidak ada kecenderungan nyata bagi fluks untuk bergerak ke satu sisi ataupun sisi yang lain.

Sebelum beralih ke masalah celah udara, kita harus mencatat bahwa pertanyaan yang sering diajukan adalah apakah penting bagi kumparan untuk dililitkan dengan erat ke rangkaian magnetik, dan apakah jika ada belitan dengan lapisan yang banyak, belitan luar sama efektifnya dengan belitan dalam. Jawabannya, adalah bahwa total MMF ditentukan semata-mata oleh jumlah belitan dan arus, dan oleh karena itu setiap belitan lengkap memberikan kontribusi yang sama untuk total MMF, terlepas dari apakah itu terjadi dengan belitan yang erat atau longgar. Tentu saja memang masuk akal bagi lilitan untuk menjadi belitan seketat mungkin, karena ini tidak hanya meminimalkan resistensi dari koil (dan dengan demikian hal tersebut akan mengurangi kehilangan panas) tetapi juga membuatnya lebih mudah mengeluarkan panas yang dihasilkan ke cangkang mesin.

Celah udara

Untuk aplikasi pada motor, kami bermaksud menggunakan kerapatan fluks yang tinggi untuk mengembangkan gaya pada konduktor pembawa arus. Kita sekarang telah melihat bagaimana cara membuat kerapatan fluks yang tinggi di dalam bagian-bagian besi dari rangkaian magnetik, tetapi secara fisik tidak mungkin untuk menempatkan konduktor pembawa arus di dalam besi. Karena itu kita perlu mengatur celah udara di rangkaian magnetik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7. Kita akan segera melihat bahwa konduktor tempat gaya diproduksi akan ditempatkan di wilayah celah udara ini.

Jika celah udara relatif kecil, seperti pada motor umumnya, kami menemukan bahwa fluks melompat melintasi celah udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7, dengan sangat sedikit kecenderungan untuk menggelembung ke udara di sekitarnya. Dengan sebagian besar garis fluks akan langsung melintasi celah udara, kerapatan fluks di wilayah kesenjangan memiliki nilai yang sama seperti halnya di dalam besi.

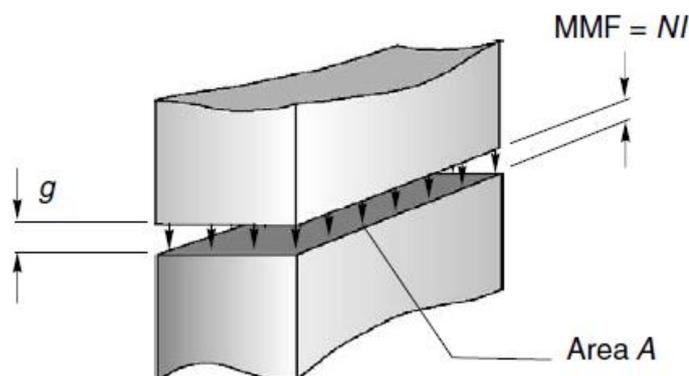
Pada sebagian besar rangkaian magnetik yang terdiri dari bagian-bagian besi dan satu atau lebih celah udara, reluctance bagian-bagian besi sangat jauh lebih sedikit daripada reluctance di celah. Pada pandangan pertama hal ini bisa tampak mengejutkan, karena jarak lintasan celah jauh lebih sedikit daripada sisa jalan melalui besi. Fakta bahwa celah udara mendominasi reluctance hanyalah refleksi dari seberapa buruk udara sebagai media magnetik, jika dibandingkan dengan besi. Untuk menempatkan perbandingan dalam perspektif, jika kita menghitung reluctance dari dua jalur dengan panjang dan luas penampang yang sama, satu berada di besi dan yang lainnya di udara, maka

reluktansi jalur udara biasanya akan 1000 kali lebih besar daripada reluktansi dari jalur besi. (Perhitungan reluktansi akan dibahas dalam Bagian 1.3.4.)

Kembali ke analogi dengan rangkaian listrik, peran bagian besi dari rangkaian magnetik dapat disamakan dengan kabel tembaga di sebuah rangkaian listrik. Keduanya menawarkan rangkaian yang berlawanan terhadap aliran (sehingga sebagian kecil dari tenaga penggerak (MMF atau EMF) dapat diabaikan dalam menyampaikan aliran ke tempat yang diinginkan secara bermanfaat) dan keduanya dapat dibentuk untuk memandu aliran arus ke arah tujuannya. Namun, ada satu perbedaan penting, dalam rangkaian listrik, tidak ada arus yang akan mengalir sampai rangkaian selesai, setelah itu semua arus terkurung di dalam kabel. Dengan rangkaian magnetik besi, beberapa fluks dapat mengalir (di udara sekitarnya) bahkan sebelum besi dipasang. Dan meskipun sebagian besar fluks selanjutnya akan mengambil rute yang mudah melalui besi, beberapa masih akan bocor ke udara, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7. Kita tidak akan mengejar kebocoran fluks di sini, meskipun terkadang penting, seperti yang akan terlihat nanti.

Reluktansi dan kerapatan fluks pada celah udara

Jika kita mengabaikan reluktansi bagian besi dari rangkaian magnetik, maka mudah untuk memperkirakan kerapatan fluks di celah udara. Karena bagian-bagian besi kemudian berlaku fluks dengan 'konduktor sempurna', tidak ada sumber MMF (NI) yang digunakan dalam menggerakkan fluks melalui bagian-bagian besi, dan semuanya tersedia untuk mendorong fluks melintasi celah udara. Situasi yang digambarkan pada Gambar 1.7 akan berubah menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.8, dimana MMF (NI) diterapkan langsung melintasi celah udara dengan panjang g .



Gambar 1.8 Wilayah celah udara dengan MMF yang bekerja melintasi sisi-kutub yang berlawanan

Untuk menentukan berapa banyak fluks yang akan melintasi celah, kita perlu tahu reluktansinya terlebih dahulu. Seperti yang diharapkan, reluktansi dari setiap bagian dari rangkaian magnetik tergantung pada dimensi, sifat magnetik, dan reluktansi dari 'prisma' udara persegi panjang, area penampang A dan panjang g seperti pada Gambar 1.8. diberikan oleh:

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{A\mu_0} \quad (1.5)$$

di mana μ_0 adalah apa yang disebut 'konstanta magnetik primer' atau 'permeabilitas ruang bebas'. Secara ketat, seperti namanya, μ_0 mengukur sifat magnetik dari ruang hampa, tetapi untuk semua tujuan rekayasa permeabilitas udara juga μ_0 . Nilai konstanta magnetik primer (μ_0) dalam sistem SI adalah $4\pi \times 10^{-7}$ agak mengejutkan, tidak ada nama untuk unit reluktansi.

Secara sepintas, kita harus mencatat bahwa jika kita ingin memasukkan reluktansi bagian besi dari rangkaian magnetik dalam perhitungan kita, reluktansi-nya akan didapatkan dari:

$$\mathcal{R}_{fe} = \frac{l_{fe}}{A\mu_{fe}}$$

dan kita harus menambahkan ini ke reluktansi dari celah udara untuk mendapatkan reluktansi total. Namun, karena permeabilitas besi (μ_{fe}) jauh lebih tinggi dari 0, reluktansi besi akan sangat jauh lebih rendah daripada reluktansi celah, meskipun panjang lintasannya jauh lebih panjang dari panjang lintasan (g) udara (*air-gap*).

Persamaan 1.5 mengungkapkan hasil yang diharapkan, bahwa menggandakan celah udara akan menggandakan reluktansi (karena fluks memiliki dua kali lebih jauh untuk pergi), sementara menggandakan medan akan membagi dua reluktansi (karena fluks memiliki dua jalur yang sama-sama menarik secara paralel). Untuk menghitung fluks, F , kami menggunakan hukum magnet Ohm (persamaan 1.4), yang memberikan

$$\Phi = \frac{MMF}{\mathcal{R}} = \frac{NI A\mu_0}{g} \quad (1.6)$$

Kami biasanya tertarik pada kerapatan fluks di celah, daripada fluks total, jadi kami menggunakan persamaan 1.1 untuk menghasilkan

$$\mathbf{B} = \frac{\Phi}{A} = \frac{\mu_0 NI}{g} \quad (1.7)$$

Persamaan 1.7 merupakan persamaan sederhana dan menyenangkan, dan darinya kita dapat menghitung kerapatan fluks celah udara, dengan begitu kita akan tahu nilai MMF dari koil (NI) dan panjang celah (g). Kita tidak perlu mengetahui rincian dari belitan koil selama kita tahu pengalihan belitan dan arus, kita juga tidak perlu mengetahui luas penampang rangkaian magnetik untuk mendapatkan nilai kerapatan fluks (meskipun perlu kita lakukan jika kita ingin mengetahui fluks total, lihat persamaan 1.6).

Sebagai contoh, misalkan kumparan magnetisasi memiliki 250 belitan, arusnya adalah 2A, dan jaraknya 1 mm. Maka kerapatan fluks kemudian diberikan oleh

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 250 \times 2}{1 \times 10^{-3}} = 0.63 \text{ Tesla}$$

(Kami tentu saja dapat memperoleh hasil yang sama menggunakan kumparan dengan 50 belitan yang membawa arus 10 A, atau kombinasi belitan dan arus lainnya memberikan MMF 500 ampere/belitan.)

Jika luas penampang besi konstan di semua titik, kerapatan fluks akan menjadi 0,63 T di mana-mana. Kadang-kadang, seperti yang telah disebutkan, potongan besi melintang berkurang pada titik-titik yang jauh dari celah udara, seperti yang ditunjukkan contohnya pada Gambar 1.3. Karena fluks dikompresi di bagian yang lebih sempit, kerapatan fluks menjadi lebih tinggi, dan pada Gambar 1.3 jika kerapatan fluks di celah udara dan di muka kutub yang berdekatan sekali lagi diambil menjadi 0,63 T, maka pada bagian aa' (dimana medan hanya setengah dari celah udara) kerapatan fluks akan menjadi $2 \times 0,63 = 1,26$ T.

Saturasi

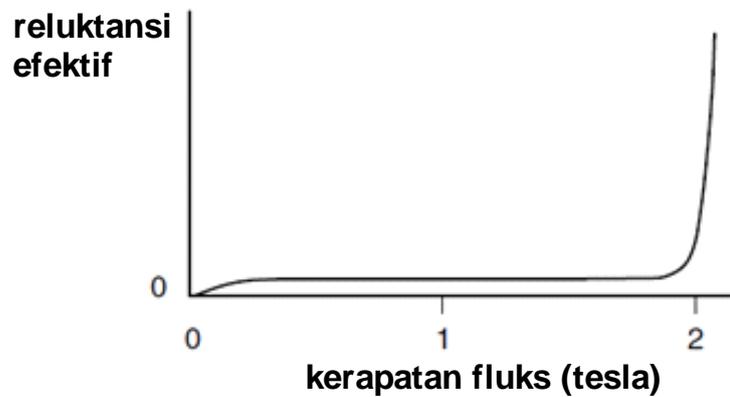
Adalah hal yang masuk akal untuk bertanya apakah ada batas kerapatan fluks dimana besi dapat dioperasikan. Kita dapat mengantisipasi kondisi dimana harus ada batasan, atau tidak akan mungkin untuk menekan fluks menjadi potongan melintang yang semakin kecil, yang kita tahu dari pengalaman tidak seperti demikian. Sebenarnya ada batasnya, meski tidak terlalu tajam.

Sebelumnya kami mencatat bahwa besi hampir tidak memiliki reluktansi, setidaknya hal tersebut tidak bisa dibandingkan dengan udara. Sayangnya kabar baik ini hanya berlaku selama kerapatan fluks tetap di bawah 1,6-1,8 T, tergantung pada jenis besi tertentu yang dimaksud. Jika kami mencoba mengkonduktansikan besi pada kerapatan fluks yang lebih tinggi, ia akan mulai menunjukkan peningkatan reluktansi yang signifikan, dan tidak lagi berperilaku seperti konduktor fluks yang ideal. Pada kerapatan fluks yang lebih tinggi ini, proporsi yang signifikan dari MMF sumber digunakan dalam menggerakkan fluks melalui besi. Situasi ini jelas tidak diinginkan, karena MMF yang tersisa hanya sedikit untuk mendorong fluks melintasi celah udara. Jadi sama seperti kami yang tidak akan merekomendasikan penggunaan pasokan resistensi tinggi ke beban dalam rangkaian listrik, kita harus menghindari kelebihan beban dari bagian besi rangkaian magnetik.

Munculnya reluktansi yang signifikan ketika kerapatan fluks dinaikkan diilustrasikan secara kualitatif pada Gambar 1.9.

Ketika reluktansi mulai meningkat, besi dikatakan mulai 'jenuh'. Istilah ini tepat, karena jika kita terus meningkatkan MMF, atau mengurangi luas besi, kita akhirnya akan mencapai kerapatan fluks

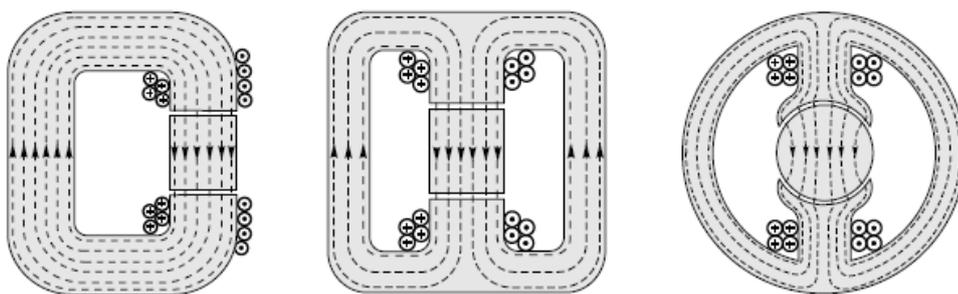
yang hampir konstan, biasanya sekitar 2 T. Untuk menghindari efek kejenuhan yang tidak diinginkan, ukuran bagian besi dari rangkaian magnetik biasanya dipilih sehingga kerapatan fluks tidak melebihi sekitar 1,5 T. Pada tingkat kerapatan fluks ini, reluktansi pada bagian-bagian besi akan lebih kecil dibandingkan dengan reluktansi pada celah udara.



Gambar 1.9. Sketsa yang menunjukkan bagaimana reluktansi besi yang efektif meningkat dengan cepat ketika kerapatan fluks mendekati titik saturasi

Rangkaian magnetik pada motor

Pembaca mungkin bertanya-tanya, mengapa begitu banyak perhatian telah difokuskan pada rangkaian magnetik C-core yang terputus-putus, ketika tampaknya memiliki sedikit kemiripan dengan rangkaian magnetik yang ditemukan pada motor. Kita sekarang akan melihat bahwa itu sebenarnya adalah langkah pendek dari C-core ke rangkaian magnetik motor, dan tidak ada ide baru yang terlibat secara mendasar.



Gambar 1.10 Evolusi rangkaian magnetik motor DC dari celah C-core

Evolusi dari C-core ke geometri motor ditunjukkan pada Gambar 1.10, yang sebagian besar harus dijelaskan sendiri dan berkaitan dengan sistem medan magnet dari sebuah motor DC.

Kami mencatat bahwa tahap pertama evolusi (Gambar 1.10, kiri) menghasilkan celah tunggal asli dengan panjang g yang dipecah menjadi dua celah panjang yaitu $g/2$, yang mencerminkan persyaratan

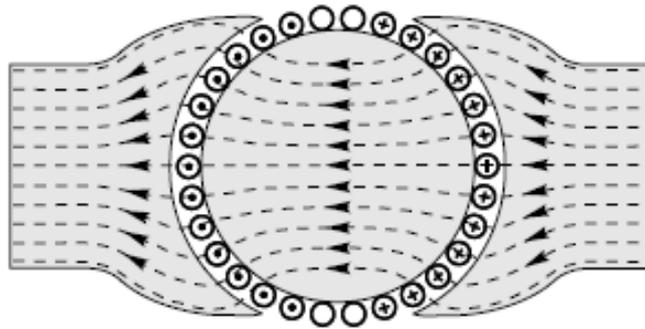
agar rotor dapat berputar. Pada saat yang sama kumparan magnetis tunggal dipecah menjadi dua untuk menjaga bentuk simetri. (Relokasi kumparan magnetisasi pada posisi yang berbeda di sekitar rangkaian magnetik tentu saja berurutan, seperti halnya baterai dapat ditempatkan di mana saja dalam rangkaian listrik.) Berikutnya, (Gambar 1.10, tengah) jalur magnet tunggal dipecah menjadi dua jalur paralel setengah dari penampang asli, yang masing-masing membawa setengah dari fluks: dan akhirnya (Gambar 1.10, kanan), jalur fluks dan permukaan kutub melengkung agar sesuai dengan rotor. Koil sekarang memiliki beberapa lapisan untuk mengurangi ruang yang tersedia, tetapi seperti yang dibahas sebelumnya ini tidak memiliki efek buruk pada MMF. Celah udara masih kecil, sehingga fluks bersilangan secara radial ke rotor.

1.4 PRODUKSI TORSI

Setelah merancang rangkaian magnetik untuk memberikan kerapatan fluks yang tinggi di area kutub, kita pasti akan memperoleh manfaat maksimal darinya. Oleh karena itu kita perlu mengatur satu set konduktor yang terpasang pada rotor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.11, dan untuk memastikan bahwa konduktor di bawah kutub N (di bagian atas Gambar 1.11) membawa arus positif (ke dalam kertas), sementara itu di bawah kutub S akan membawa arus negatif. Gaya tangensial elektromagnetik (' BII ') (lihat persamaan 1.2) pada semua konduktor positif akan berada di sebelah kiri, sedangkan gaya yang negatif akan ke kanan. Pasangan nett atau torsi akan diberikan pada rotor yang akan memproduksi rotasi.

Pada titik ini kita harus berhenti dan menjawab tiga pertanyaan yang sering muncul ketika ide-ide ini sedang dikembangkan. Yang pertama adalah untuk bertanya mengapa kami tidak membuat referensi ke medan magnetik yang diproduksi oleh konduktor pembawa arus pada rotor. Tentunya mereka juga akan menghasilkan medan magnet, yang mungkin akan mengganggu medan asli di celah udara, dalam hal ini mungkin ungkapan yang digunakan untuk menghitung gaya pada konduktor tidak akan lagi berlaku.

Jawaban untuk pertanyaan yang sangat perseptif ini adalah bahwa medan yang diproduksi oleh konduktor pembawa arus pada rotor tentunya akan memodifikasi medan asli (yaitu medan yang ada ketika tidak ada arus dalam konduktor rotor.) Tetapi di sebagian besar motor, gaya pada konduktor dapat dihitung dengan benar dari pengalihan arus dan medan 'asli'. Ini sangat menguntungkan dari sudut pandang penghitungan gaya, tetapi juga memiliki alasan logis untuk itu. Sebagai contoh pada Gambar 1.1, kita tidak akan mengharapkan adanya gaya pada konduktor pembawa arus jika tidak ada medan yang diterapkan secara eksternal, meskipun arus dalam konduktor akan menghasilkan medan sendiri (ke atas di satu sisi konduktor dan ke bawah pada sisi yang lain). Jadi sepertinya benar bahwa karena kita hanya memperoleh gaya ketika ada medan eksternal, semua gaya harus disebabkan oleh medan itu saja.



Gambar 1.11 Konduktor pembawa arus pada rotor diposisikan untuk memaksimalkan torsi. (Sumber garis fluks magnetik (panah) tidak diperlihatkan.)

Pertanyaan kedua muncul ketika kita berpikir tentang prinsip aksi dan reaksi. Ketika ada torsi pada rotor, mungkin ada torsi yang sama dan berlawanan pada stator; oleh karena itu kita mungkin bertanya-tanya apakah mekanisme produksi torsi dapat digambarkan menggunakan ide yang sama seperti yang kita gunakan untuk mendapatkan torsi pada rotor. Jawabannya iya; selalu ada torsi yang sama dan berlawanan pada stator, itulah sebabnya mengapa penting untuk melambatkan motor dengan aman. Dalam beberapa mesin (misalnya motor induksi) mudah untuk melihat bahwa torsi dihasilkan pada stator oleh interaksi kerapatan fluks celah udara dan arus stator, dengan cara yang persis sama dengan kerapatan fluks yang berinteraksi dengan arus rotor, untuk menghasilkan torsi pada rotor. Di motor lain, (mis. motor yang telah kita lihat), tidak ada argumen fisik sederhana yang dapat diajukan untuk menurunkan torsi pada stator, namun tetap sama dan berlawanan dengan torsi pada rotor.

Pertanyaan terakhir berkaitan dengan kesamaan antara set-up yang ditunjukkan pada Gambar 1.10 dan pola medan yang dihasilkan, misalnya oleh elektromagnetik yang digunakan untuk mengangkat badan mobil di *scrap yard*. Dari apa yang kita ketahui tentang gaya tarik besar yang dapat dihasilkan oleh magnet pengangkat, mungkin kita tidak mengharapkan gaya radial besar antara kutub stator dan besi rotor? Dan jika ada, apa yang bisa mencegah rotor ditarik ke stator?

Sekali lagi, jawaban positifnya adalah bahwa memang ada gaya radial akibat gaya tarik magnet, persis seperti pada magnet pengangkat atau relay, meskipun mekanisme dimana medan magnet memberikan tarikan saat memasuki besi atau baja sama sekali berbeda dari gaya 'BII' yang telah kita lihat sejauh ini.

Ternyata gaya tarik per satuan luas muka kutub sebanding dengan kuadrat kerapatan fluks radial, dan dengan kerapatan fluks celah udara hingga 1 T pada motor, gaya per satuan luas permukaan rotor bekerja dengan baik, yaitu sekitar 40 N/cm^2 . Ini menunjukkan bahwa total gaya radial bisa sangat besar: misalnya gaya tarik pada permukaan tiang kecil dengan ukuran $5 \times 10 \text{ cm}$ adalah 2000 N, atau sekitar 200 Kg. Gaya ini tidak memberikan kontribusi banyak pada torsi motor, serta hanya

merupakan produk sampingan yang tidak disukai dari mekanisme "BII" yang kami terapkan untuk menghasilkan gaya tangensial pada konduktor rotor.

Pada kebanyakan mesin, gaya magnet radial di bawah masing-masing kutub sebenarnya jauh lebih besar daripada gaya elektromagnetik tangensial pada konduktor rotor, dan seperti yang disiratkan, ia cenderung menarik rotor ke kutub. Namun, sebagian besar motor dibangun dengan sejumlah kutub yang sama-sama berjarak tidak jauh dari rotor, serta kerapatan fluks di setiap kutub adalah sama, sehingga secara teori setidaknya gaya yang dihasilkan pada rotor lengkap adalah nol. Dalam praktiknya, bahkan eksentrisitas kecil akan menyebabkan medan menjadi lebih kuat di bawah kutub di mana celah udara lebih kecil, ini akan menimbulkan tarikan yang tidak seimbang, yang mengakibatkan suara yang bising dan keausan bantalan yang cepat.

Besaran torsi

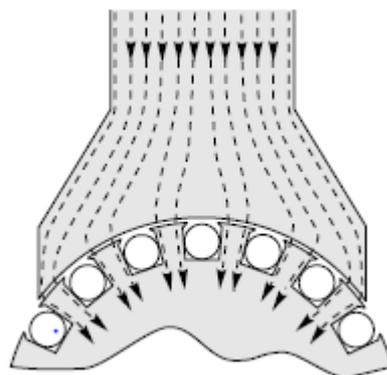
Kembali ke diskusi awal kita, gaya pada masing-masing konduktor diberikan oleh persamaan 1.2, dan selanjutnya gaya tangensial total F tergantung pada kerapatan fluks yang dihasilkan oleh belitan medan, jumlah konduktor pada rotor, arus pada masing-masing, dan panjang rotor. Torsi atau pasangan yang dihasilkan (T) tergantung pada jari-jari rotor (r), dan kemudian diberikan oleh

$$T = Fr \quad (1.8)$$

Kita akan mengembangkan ini lebih lanjut di Bagian 1.5, setelah kita memeriksa manfaat luar biasa yang diperoleh dengan menempatkan konduktor ke dalam slot.

Keindahan slotting

Jika konduktor dipasang pada permukaan besi rotor, seperti pada Gambar 1.11, celah udara setidaknya harus sama dengan diameter kawat, dan konduktor harus diamankan ke rotor untuk mentransmisikan gaya beloknya. Motor yang paling awal dibuat seperti ini, dengan tali atau pita untuk mengikat konduktor ke rotor.



Gambar 1.12 Pengaruh pada jalur fluks ketika rotor slotting untuk mengakomodasi konduktor

Sayangnya, celah udara yang besar menghasilkan reluktansi tinggi yang tidak disukai di rangkaian magnetik, oleh karenanya lilitan medan magnet memerlukan banyak belitan dan arus yang tinggi untuk menghasilkan kerapatan fluks yang diinginkan di celah udara. Ini berarti bahwa belitan medan menjadi sangat besar dan menghabiskan banyak daya. Perintis awal (abad ke-19) segera mendapat gagasan untuk membenamkan sebagian konduktor pada rotor ke dalam alur yang dibuat paralel dengan poros, maksudnya adalah untuk memungkinkan celah udara dikurangi, sehingga belitan diharapkan bisa lebih kecil. Ini bekerja sangat baik, karena memberikan lokasi yang lebih positif untuk konduktor rotor, dan dengan demikian memungkinkan gaya pada mereka untuk ditransmisikan ke tubuh rotor. Tak lama konduktor mulai tersembunyi ke dalam slot yang lebih dalam sampai akhirnya (lihat Gambar 1.12) mereka tidak lagi berdiri tegak dalam permukaan rotor dan celah udara dapat dibuat kecil dan konsisten dengan kebutuhan untuk jarak bebas mekanis antara rotor dan stator. Mesin 'slotted' baru bekerja dengan sangat baik, dan pembuat pragmatis mereka tidak peduli dengan gemuruh ketidakpuasan dari para ahli teori yang skeptis.

Para ahli teori sepanjang waktu menerima bahwa konduktor yang ditenggelamkan ke dalam slot memungkinkan celah udara dibuat kecil, seperti yang dapat dilihat dari Gambar 1.12, hampir semua fluks sekarang akan melewati jalur reluktansi rendah melalui gerigi, membiarkan konduktor terkena kerapatan fluks dan kebocoran yang sangat rendah dalam slot. Tentunya, mereka berpendapat bahwa sedikit atau tidak ada gaya 'BII' akan dikembangkan pada konduktor, karena hal itu hanya akan terkena kerapatan fluks yang sangat rendah.

Pendapat para skeptis benar bahwa fluks memang mengalir ke bawah gerigi; tetapi tidak dapat disangkal bahwa motor dengan rotor berlubang menghasilkan torsi yang sama dengan konduktor pada celah udara, asalkan kerapatan fluks rata-rata pada permukaan rotor sama. Jadi apa yang bisa menjelaskan hal ini yang tampaknya terlalu bagus untuk menjadi situasi yang sebenarnya?

Pencarian untuk suatu penjelasan menyibukkan beberapa pemikir terkemuka cukup lama, setelah slotting menjadi norma, tetapi akhirnya menjadi mungkin untuk memverifikasi secara teoritis bahwa torsi total tetap sama seperti jadinya jika konduktor benar-benar dalam fluks, tetapi hampir semua dari gaya tangensial sekarang bekerja pada gerigi rotor, bukan pada konduktor itu sendiri.

Ini adalah berita yang sangat bagus. Dengan menempatkan konduktor dalam slot, secara bersamaan memungkinkan reluktansi rangkaian magnetik menjadi berkurang, dan mentransfer gaya dari konduktor itu sendiri ke sisi gerigi besi yang kuat dan mampu mentransmisikan torsi yang dihasilkan ke poros. Manfaat lebih lanjut adalah bahwa isolasi di sekitar konduktor tidak lagi harus mentransmisikan gaya tangensial ke rotor, dengan demikian sifat mekaniknya menjadi lebih kuat. Percobaan tentatif jarang dilakukan dengan satu tujuan yang telah menghasilkan hasil yang memuaskan di hampir setiap arah yang relevan.

Namun, ada beberapa hambatan. Untuk memaksimalkan torsi, kita ingin arus sebanyak mungkin pada konduktor rotor. Secara alami kita akan mengerjakan tembaga pada kerapatan arus tertinggi yang dapat dipraktekkan (biasanya antara 2 dan 8 A/mm²), tetapi kita juga ingin memaksimalkan luas penampang slot untuk mengakomodasi tembaga sebanyak mungkin. Ini akan mendorong kita ke arah slot yang lebar, oleh karenanya gerigi menjadi sempit. Tetapi kita perlu ingat bahwa fluks harus lewat secara radial ke bawah gerigi, jadi jika kita membuat gerigi terlalu sempit, maka besi pada gerigi akan jenuh dan menyebabkan rangkaian magnetik menjadi buruk. Ada juga kemungkinan untuk meningkatkan kedalaman slot, tetapi ini tidak dapat diambil terlalu jauh atau daerah tengah besi rotor yang harus membawa fluks dari satu kutub ke kutub yang lain akan menjadi sangat terkuras sehingga juga akan mudah mengalami kejenuhan.

Pada bagian selanjutnya kita akan melihat apa yang menentukan torsi yang dapat diperoleh dari rotor dengan ukuran tertentu, dan juga melihat bagaimana kecepatan memainkan peran penting dalam menentukan keluaran daya.

1.5 BEBAN KHUSUS DAN KELUARAN KHUSUS

Beban khusus

Kompromi desain tidak dapat dihindari di bagian celah udara yang penting, oleh karena itu desainer terus-menerus harus melatih keterampilan mereka untuk mencapai keseimbangan terbaik antara tuntutan yang saling bertentangan pada ruang yang dibuat oleh fluks (radial) dan arus (aksial).

Seperti dalam sebagian besar desain teknik, pedoman muncul tentang apa yang dapat dicapai sehubungan dengan ukuran dan jenis mesin tertentu, dan perancang motor biasanya bekerja dalam dua parameter, pembebanan magnetik spesifik dan pembebanan listrik spesifik. Parameter ini memiliki kaitan langsung pada keluaran motor, seperti yang akan kita lihat selanjutnya.

Pembebanan magnetik spesifik (B) adalah rata-rata besarnya kerapatan fluks radial di atas seluruh permukaan silinder rotor. Karena slotting, kerapatan fluks rata-rata selalu lebih kecil dari kerapatan fluks pada gerigi, tetapi untuk menghitung pembebanan magnetik, kami menggambarkan rotor menjadi halus, dan menghitung kerapatan fluks rata-rata dengan membagi total fluks radial dari masing-masing 'kutub' dengan luas permukaan di bawah kutub.

Pembebanan listrik spesifik (biasanya dilambangkan dengan simbol (A), singkatan A merepresentasikan Ampere) adalah arus aksial per meter keliling rotor. Dalam sloter rotor, arus aksial terkonsentrasi dalam konduktor dalam setiap slot, tetapi untuk menghitung A kita akan menggambarkan total arus yang akan disebar secara merata di atas keliling (dengan cara yang mirip dengan ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar 1.12, tetapi dengan masing-masing konduktor) di bawah masing-masing kutub diwakili oleh 'arus' yang didistribusikan secara seragam). Sebagai

contoh, jika di bawah tiang dengan panjang keliling 10 cm kita mengetahui bahwa ada lima slot, masing-masing membawa arus sebesar 40 A,

$$\text{beban listrik adalah } \frac{5 \times 40}{0.1} = 2000 \text{ A/m}$$

Banyak faktor yang mempengaruhi nilai-nilai yang dapat digunakan dalam desain motor, tetapi pada dasarnya pembebanan magnetik dan listrik spesifik dibatasi oleh sifat material (besi untuk fluks dan tembaga untuk arus), dan oleh sistem pendingin yang digunakan untuk menghilangkan kerugian panas.

Pembebanan magnetik spesifik tidak berbeda jauh dari satu mesin ke mesin yang lain, karena sifat saturasi kebanyakan inti baja adalah sama. Di sisi lain, variasi yang cukup luas terjadi pada pembebanan listrik spesifik, karena akan tergantung pada jenis pendinginan yang digunakan.

Meskipun resistivitas dari konduktor tembaga rendah, panas tetap dihasilkan oleh aliran arus, oleh karena itu arus harus dibatasi pada nilai sedemikian rupa sehingga isolasi tidak rusak oleh kenaikan suhu yang berlebihan. Semakin efektif sistem pendingin, maka semakin tinggi kemampuan pemuatan listrik. Sebagai contoh, jika motor benar-benar tertutup dan tidak memiliki kipas internal, kerapatan arus dalam tembaga harus jauh lebih rendah daripada di motor serupa yang memiliki kipas untuk menyediakan aliran udara sebagai ventilasi yang kontinu. Demikian pula, belitan yang diresapi penuh dengan pernis dapat bekerja lebih keras daripada yang dikelilingi oleh udara, karena badan padat pernis enkapsulasi memberikan jalur termal yang jauh lebih baik, dimana panas dapat mengalir ke badan stator. Ukuran keseluruhan juga berperan dalam menentukan pembebanan listrik yang diizinkan, motor berukuran besar umumnya memiliki nilai beban yang lebih tinggi daripada motor yang berukuran kecil.



Plat 1.1 Motor induksi sangkar berventilasi kipas tertutup total (TEFV). Contoh khusus ini memiliki rating 200 W (0,27 HP) pada 1450 RPM, dan berada di ujung bawah rentang daya untuk versi 3 fasa. Casing terbuat dari aluminium cor, dengan udara pendingin disediakan oleh kipas yang tertutup di ujung bagian non-drive.

Perhatikan ketentuan untuk pemasangan alternatif. (Foto oleh Brook Crompton)

Dalam prakteknya, poin penting yang harus diingat adalah bahwa jika tidak menggunakan sistem pendingin yang eksotis, sebagian besar motor (induksi, DC, dll.) dari ukuran tertentu memiliki kurang lebih pemuatan spesifik yang sama, terlepas dari jenisnya. Seperti yang kita lihat sekarang ini, pada gilirannya berarti motor dengan ukuran yang sama memiliki kemampuan torsi yang sama. Fakta ini tidak dihargai secara luas oleh pengguna, tetapi selalu layak untuk diingat.

Torsi dan Volume motor

Berdasarkan diskusi sebelumnya, kita dapat memperoleh gaya tangensial total dengan terlebih dahulu mempertimbangkan luas permukaan rotor dengan lebar w dan panjang L . Arus aksial yang mengalir dalam lebar w diberikan oleh $I = w\bar{A}$, dan rata-rata semua dari arus ini terpapar dengan kerapatan fluks radial \bar{B} , sehingga gaya tangensial diberikan (dari persamaan 1.2) oleh $\bar{B} \times w\bar{A} \times L$. Luas permukaan adalah wL , jadi gaya per satuan luas adalah $\bar{B} \times \bar{A}$. Kita melihat bahwa pengalihan dari dua pembebanan spesifik mengekspresikan tegangan tangensial rata-rata di atas permukaan rotor.

Untuk mendapatkan gaya tangensial total, kita harus mengalikan dengan luas permukaan lengkung rotor, sedangkan untuk mendapatkan torsi total, kita harus mengalikan gaya total dengan jari-jari rotor. Karenanya untuk rotor berdiameter D dan panjang L , torsi total diberikan oleh

$$T = (\bar{B}\bar{A}) \times (\pi DL) \times \frac{D}{2} = \frac{\pi}{2} (\bar{B}\bar{A}) D^2 L \quad (1.9)$$

Persamaan ini sangat penting. Istilah D^2L sebanding dengan volume rotor, jadi kita melihat bahwa untuk nilai dari muatan magnetik dan muatan listrik tertentu, torsi dari motor apapun sebanding dengan volume rotor. Kita bisa memilih rotor tipis panjang atau gemuk pendek, tetapi begitu volume rotor dan beban spesifik ditentukan, maka kita telah bisa secara efektif menentukan torsi dari motor.

Patut ditekankan bahwa kita belum fokus pada jenis motor tertentu, tetapi telah mendekati pertanyaan tentang produksi torsi dari sudut pandang yang sepenuhnya umum. Pada intinya kesimpulan kami mencerminkan fakta bahwa semua motor terbuat dari besi dan tembaga, **dan hanya berbeda dalam cara bahan ini dibuang**. Kita juga harus mengakui bahwa dalam praktiknya, volume keseluruhan motor adalah hal yang penting, bukan volume rotor. Tetapi lagi-lagi kami menemukan bahwa terlepas dari jenis motor, ada hubungan yang cukup dekat antara volume keseluruhan dan volume rotor, untuk motor dengan torsi yang sama. Karena itu kita dapat membuat pernyataan berani tetapi secara umum akurat, bahwa volume keseluruhan motor ditentukan oleh torsi yang harus dihasilkan. Tentu saja ada pengecualian untuk aturan ini, tetapi sebagai pedoman umum untuk pemilihan motor, ini sangat berguna.

Setelah melihat bahwa torsi tergantung pada volume rotor, kita sekarang harus mengalihkan perhatian kita ke pertanyaan tentang keluaran daya.

Keluaran daya spesifik-pentingnya kecepatan

Sebelum memperoleh ekspresi daya, penyimpangan singkat mungkin bermanfaat bagi mereka yang lebih akrab dengan sistem linear daripada sistem putar (*rotary*).

Dalam sistem SI, unit usaha atau energi adalah Joule (J). Satu joule mewakili usaha yang dilakukan oleh torsi 1 newton yang bergerak 1 meter ke arahnya sendiri. Oleh karena itu, usaha yang dilakukan (W) oleh gaya F yang bergerak dengan jarak d diberikan oleh

$$W = F x d$$

Dengan F dalam newton dan d dalam meter, W jelas dalam newton-meter (Nm), dimana kita bisa melihat bahwa newton-meter sama dengan joule.

Dalam sistem putar, lebih mudah untuk bekerja dalam hal torsi dan jarak sudut daripada gaya dan jarak linier, tetapi hal ini terkait erat seperti yang dapat kita lihat dengan mempertimbangkan apa yang terjadi ketika gaya tangensial F diterapkan pada jari-jari r dari pusat rotasi. Torsi secara sederhana diberikan oleh

$$T = F x r$$

Sekarang anggaplah lengan berputar melalui sudut θ , sehingga jarak keliling yang ditempuh oleh gaya adalah $r \times \theta$. Usaha yang dilakukan oleh gaya kemudian diberikan oleh

$$W = F \times (r \times \theta) = (F \times r) \times \theta = T \times \theta \quad (1.10)$$

Kami mencatat bahwa dalam kerja sistem linier maka gaya dikali dengan jarak, dalam hal kerja sistem putar maka sudut dikali dengan torsi. Satuan torsi adalah newton-meter (Nm), dan sudut diukur dalam radian (yang tidak berdimensi), sehingga satuan kerja yang dilakukan adalah **Nm**, atau **Joule**, seperti yang diharapkan. (Fakta bahwa torsi dan gaya (atau energi) diukur dalam unit yang sama tampaknya tidak jelas bagi penulis ini!)

Untuk menemukan daya atau tingkat kerja, kami membagi pekerjaan yang dilakukan pada saat eksperimen. Dalam sistem linier, serta dengan asumsi bahwa kecepatan tetap konstan, maka daya diberikan oleh

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \times d}{t} = F \times v \quad (1.11)$$

dimana v adalah kecepatan linier. sudut yang setara diberikan oleh

$$P = \frac{W}{t} = \frac{T \times \theta}{t} = T \times \omega \quad (1.12)$$

dimana ω adalah kecepatan sudut (konstan), dalam radian per detik.

Kita sekarang dapat mengekspresikan keluaran daya dalam hal dimensi rotor dan pembebanan spesifik, menggunakan persamaan 1.9 yang menghasilkan

$$P = T\omega = \frac{\pi}{2}(\bar{B}\bar{A})D^2L\omega \quad (1.13)$$

Persamaan 1.13 menekankan pentingnya kecepatan dalam menentukan keluaran daya. Untuk muatan spesifik dan magnetik tertentu, jika kita menginginkan motor dengan torsi tertentu, kita dapat memilih antara motor besar dengan kecepatan tinggi (dan karenanya mahal) atau motor kecil kecepatan tinggi (dan lebih murah). Pilihan terakhir lebih disukai untuk sebagian besar aplikasi, bahkan untuk beberapa bentuk pengurangan kecepatan penggunaan belt atau gear diperlukan, karena motor yang lebih kecil lebih murah. Contoh yang umum termasuk alat listrik portabel, di mana kecepatan rotor 12.000 putaran/ menit atau lebih memungkinkan daya ratusan watt diperoleh, dan traksi listrik: di mana kedua kasus, motor dengan kecepatan tinggi diarahkan untuk penggerak akhir. Dalam contoh-contoh ini, di mana volume dan berat berada pada kondisi premium, pengendalian langsung akan keluar dari pertanyaan.

Signifikansi kecepatan digarisbawahi ketika kita mengatur ulang persamaan 1.13 untuk mendapatkan ekspresi keluaran daya spesifik (daya per unit volume rotor), Q , diberikan oleh

$$Q = \bar{B}\bar{A} \frac{\omega}{2} \quad (1.14)$$

Untuk memperoleh keluaran spesifik setinggi mungkin untuk nilai yang diberikan dari muatan magnetik dan listrik tertentu, kita harus mengoperasikan motor dengan jelas pada kecepatan tertinggi yang dapat dipraktikkan. Satu kelemahan yang jelas dari motor kecil berkecepatan tinggi dengan gearbox adalah bahwa gangguan kebisingan (baik dari motor itu sendiri maupun dari transmisi daya) lebih tinggi daripada dari motor penggerak langsung yang lebih besar. Ketika kebisingan harus diminimalkan (misalnya pada kipas langit-langit), motor penggerak langsung lebih disukai, meskipun ukurannya lebih besar.

1.6 KONVERSI ENERGI – GERAKAN GGL

Kita sekarang berpaling dari pertimbangan apa yang menentukan kemampuan keseluruhan motor ke bagian yang hampir ekstrim lainnya, dengan memeriksa perilaku mesin linear primitif, meskipun sangat sederhana, merangkum semua proses konversi energi elektromagnetik adalah kunci yang terjadi di motor listrik. Kita akan melihat bagaimana proses konversi energi dari bentuk listrik ke bentuk mekanis diwakili secara elegan dalam 'rangkaian setara' di mana semua aspek kunci dari perilaku motor dapat diprediksi. Rangkaian ini akan memberikan jawaban atas pertanyaan-pertanyaan seperti 'bagaimana motor secara otomatis menarik lebih banyak daya ketika diharuskan untuk bekerja', dan 'apa yang menentukan kecepatan dan arus tetap'. Inti dari pertanyaan semacam itu adalah masalah pergerakan GGL yang dieksplorasi pada tahap selanjutnya.

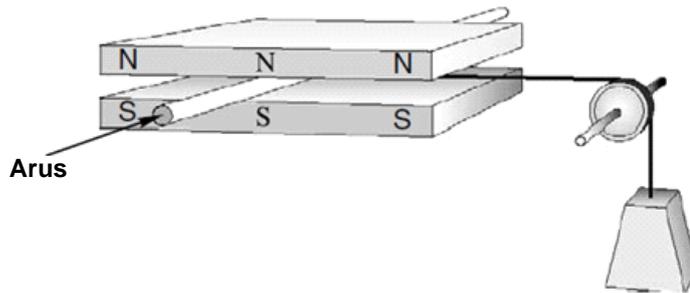
Kita telah melihat bahwa gaya (dan juga torsi) dihasilkan pada konduktor pembawa arus yang terpapar ke medan magnet. Gaya diberikan oleh persamaan 1.2, yang menunjukkan bahwa selama kerapatan fluks dan arus tetap konstan, gaya juga akan konstan. Secara khusus, kita melihat bahwa gaya tidak bergantung pada apakah konduktor diam atau bergerak. Di sisi lain, gerakan relatif adalah persyaratan penting dalam produksi daya keluaran mekanis (berbeda dari torsi), dan kita telah melihat bahwa daya keluaran diberikan oleh persamaan $P = T\omega$. Kita sekarang akan melihat bahwa kehadiran gerakan relatif antara konduktor dan medan magnet selalu membawa 'GGL' ke dalam permainan; dan kita akan melihat bahwa GGL memainkan peran kunci dalam mengukur proses konversi energi.

Dasar-dasar Motor: kondisi stasioner

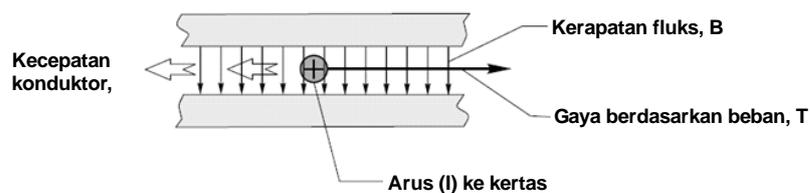
Mesin linear primitif ditunjukkan dalam bentuk foto pada Gambar 1.13 dan dalam bentuk diagram pada Gambar 1.14.

Ini terdiri dari konduktor aktif panjang atau yang dapat bergerak horizontal tegak lurus terhadap kerapatan fluks magnetik B .

Diasumsikan bahwa konduktor memiliki resistansi (R), yang dibawa oleh arus DC (I), dan bergerak dengan kecepatan (v) dengan arah yang tegak lurus terhadap medan dan arus (lihat Gambar 1.14). bagian yang terlampir pada konduktor adalah tali yang melewati katrol dan menopang beban: ketegangan dalam tali bertindak sebagai 'beban' mekanis pada batang, gesekan di asumsikan menjadi nol.



Gambar 1.13 Motor DC linear primitif



Gambar 1.14 Model diagram motor DC linear primitif

Kita tidak perlu khawatir tentang banyaknya praktik sulit dalam membuat mesin seperti itu, tidak terkecuali bagaimana kita dapat mengelola sambungan listrik ke konduktor yang bergerak. Poin penting adalah bahwa meskipun ini adalah sebuah hipotesis, ini mewakili apa yang terjadi pada motor yang ril, dan ini memungkinkan kita untuk mendapatkan pemahaman yang jelas tentang bagaimana mesin ril berperilaku sebelum kita memahami struktur yang jauh lebih kompleks.

Kita mulai dengan mempertimbangkan masukan daya listrik dengan stasioner-stasioner (mis. $v = 0$). Untuk tujuan diskusi ini, kita dapat mengandaikan bahwa medan magnet (B) disediakan oleh magnet permanen. Setelah medan magnet ditetapkan (ketika magnet pertama kali dimagnetisasi dan ditempatkan pada posisi tertentu), tidak ada energi lebih lanjut yang diperlukan untuk mempertahankan medan magnet yang sama baiknya, karena jelas bahwa magnet lembam tidak mampu mencatu energi secara terus menerus. Oleh karena itu ketika kita memperoleh keluaran mekanik dari 'motor' primitif ini, tidak ada energi yang terlibat berasal dari magnet. Ini adalah poin yang sangat penting: sistem medan, baik yang disediakan dari magnet permanen atau belitan '**menarik**', hanya

bertindak sebagai katalis dalam proses konversi energi, dan tidak memberikan kontribusi banyak terhadap daya keluaran mekanis.

Ketika konduktor tidak bergerak, gaya yang dihasilkan di atasnya (BII) tidak bekerja, sehingga tidak ada daya keluaran mekanis, dan satu-satunya masukan daya listrik yang diperlukan adalah yang digunakan untuk menggerakkan arus melalui konduktor. Resistansi konduktor adalah R dan arus yang melalui itu adalah I , sehingga tegangan yang harus diterapkan ke ujung batang dari sumber eksternal akan diberikan oleh $VI = IR$, dan masukan daya listrik akan menjadi V_1I atau I^2R . Dalam kondisi ini, semua masukan daya listrik akan muncul sebagai panas di dalam konduktor, dan keseimbangan daya dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\text{daya listrik masukan } (V_1I) = \text{tingkat produksi panas dalam konduktor } (I^2R) \quad (1.15)$$

Meskipun tidak ada pekerjaan yang dilakukan karena tidak ada pergerakan, kondisi diam hanya dapat dipertahankan jika ada keseimbangan torsi. Ketegangan dalam string (T) harus sama dengan gaya gravitasi pada massa (mg), dan ini pada gilirannya harus diimbangi oleh gaya elektromagnetik pada konduktor (BII). Oleh karena itu dalam kondisi stasioner arus harus diberikan oleh:

$$T = mg = BIl, \text{ atau } I = \frac{MG}{BI} \quad (1.16)$$

Ini adalah indikasi pertama kami tentang hubungan antara dunia mekanik dan listrik, karena kami melihat bahwa untuk menjaga kondisi stasioner, arus dalam konduktor ditentukan oleh massa beban mekanik. Kami akan kembali ke pembahasan ini nanti.

Hubungan torsi dengan konduktor yang bergerak dengan kecepatan konstan

Sekarang mari kita bayangkan situasi dimana konduktor bergerak dengan kecepatan konstan (v) ke arah gaya elektromagnetik yang mendorongnya. Berapa arus yang harus ada dalam konduktor, dan berapa tegangan yang harus diterapkan di ujungnya?

Kita mulai dengan mengetahui bahwa kecepatan konstan dari konduktor berarti massa (m) bergerak ke atas pada kecepatan yang konstan, misalnya itu bukan akselerasi. Karena itu berdasarkan hukum Newton, tidak boleh ada gaya yang dihasilkan bekerja pada massa, sehingga tegangan dalam string (T) harus sama dengan berat (mg). Demikian pula, konduktor tidak berakselerasi, sehingga *nett force*-nya juga harus sama dengan nol. Tali memberikan gaya pengereman (T), sehingga gaya elektromagnetik (BII) harus sama dengan T . Dengan menggabungkan kondisi ini, maka dihasilkan:

$$T = mg = BIl, \text{ atau } I = \frac{mg}{BI} \quad (1.17)$$

Persamaan ini persis sama dengan persamaan yang kami peroleh dalam kondisi stasioner, dan ini menggarisbawahi fakta bahwa arus keadaan tunak ditentukan oleh beban mekanis. Ketika kita mengembangkan rangkaian ekuivalen, kita harus membiasakan diri dengan gagasan bahwa dalam kondisi mapan, salah satu variabel listrik (arus) ditentukan oleh beban mekanis.

Dengan kenaikan massa pada kecepatan konstan, usaha mekanis sedang dilakukan karena energi potensial massa meningkat. Usaha ini berasal dari konduktor yang bergerak. Daya keluaran mekanis sama dengan laju usaha, yaitu gaya ($T = BIl$) dikalikan kecepatan (v). Daya yang hilang sebagai panas dalam konduktor sama dengan daya di dalam stasioner, karena ia memiliki resistansi dan arus yang sama. Masukan daya listrik yang dicatu ke konduktor terus menghasilkan kehilangan panas, tetapi di samping itu, ia harus mencatu daya untuk keluaran mekanis. Namun kita belum tahu berapa tegangan yang harus diterapkan, jadi kita akan menyatakannya dengan V_2 . Persamaan *power-balance* sekarang menjadi:

$$\begin{aligned} \text{masukan daya listrik } (V_2 I) &= \\ \text{laju produksi panas dalam konduktor} &+ \text{ daya keluaran mekanik} \\ &= I^2 R + (BIl)v \end{aligned} \tag{1.18}$$

Kami mencatat bahwa suku pertama di sisi kanan persamaan 1.18 menunjukkan efek dari pemanasan yang sama dengan ketika konduktor konstan, sedangkan suku kedua mewakili daya tambahan yang harus dicatu untuk menyediakan keluaran mekanis. Karena saat ini sama, tetapi masukan daya sekarang lebih besar, tegangan baru V_2 harus lebih tinggi dari V_1 . Dengan mengurangi persamaan 1.15 dari persamaan 1.18 maka kita memperoleh:

$$V_2 I - V_1 I = (BIl)v$$

Dan juga

$$V_2 - V_1 = Blv = E \tag{1.19}$$

Persamaan 1.19 menghitung tegangan ekstra yang disediakan oleh sumber untuk menjaga arus konstan ketika konduktor bergerak. Peningkatan tegangan sumber ini merupakan cerminan dari fakta bahwa setiap kali konduktor bergerak melalui medan magnet, maka GGL (E) akan diinduksi di dalamnya.

Kita dapat melihat dari persamaan 1.19 bahwa GGL berbanding lurus dengan kerapatan fluks, dengan kecepatan konduktor yang relatif terhadap fluks, dan dengan panjang konduktor aktif. Tegangan sumber harus mengatasi tegangan tambahan ini untuk menjaga agar arus yang sama tetap

mengalir: jika tegangan sumber tidak meningkat, arus akan turun segera setelah konduktor mulai bergerak karena efek yang berlawanan dari GGL.

Kami telah menyimpulkan bahwa pasti ada GGL yang disebabkan oleh gerakan, dan telah memperoleh ungkapan untuk itu dengan menggunakan prinsip konservasi energi, tetapi hasil yang kami peroleh adalah:

$$E = Blv \quad (1.20)$$

sering diperkenalkan sebagai bentuk 'pemotongan fluks' dari hukum Faraday, yang menyatakan bahwa ketika sebuah konduktor bergerak melalui medan magnet, maka GGL diberikan oleh persamaan 1.20 yang diinduksi di dalamnya. Karena gerak adalah bagian penting dari mekanisme ini, GGL induksi disebut sebagai 'motional GGL.'. Terminologi 'pemotongan fluks' muncul karena mengaitkan asal-usul GGL untuk memotong atau mengiris garis fluks dengan melewati konduktor. Ini adalah gambaran yang berguna, meskipun itu tidak boleh didorong terlalu jauh: garis fluks pada akhirnya hanyalah penemuan yang kami bantu untuk mengatasi masalah-masalah magnetik.

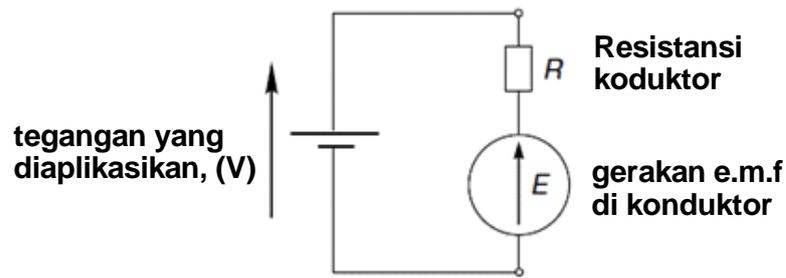
Sebelum beralih ke rangkaian ekuivalen motor primitif, dua titik umum perlu diperhatikan. Pertama, setiap kali energi diubah dari bentuk listrik ke bentuk mekanis, seperti di sini misalnya, induksi selalu bertindak berlawanan dengan tegangan (sumber) yang diterapkan. Ini tercermin dalam penggunaan istilah 'back e.m.f' (GGL balik) untuk menggambarkan GGL di motor. Kedua, meskipun kita telah membahas situasi tertentu dimana konduktor membawa arus, tentu saja tidak diperlukan arus apa pun untuk mengalir agar dapat menghasilkan GGL: semua yang diperlukan adalah gerakan relatif antara konduktor dan medan magnet.

1.7 RANGKAIAN EKUIVALEN

Kita dapat merepresentasikan hubungan listrik pada mesin primitif dalam rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.15.

Resitansi konduktor dan GGL bersama-sama mewakili beberapa hal yang terjadi dalam rangkaian konduktor (meskipun dalam kenyataannya, GGL dan hambatan didistribusikan, tidak disatukan sebagai item yang terpisah). Sumber yang diterapkan secara eksternal yang menggerakkan arus diwakili oleh tegangan V di sebelah kiri (simbol baterai kuno yang sengaja digunakan untuk membedakan tegangan yang diberikan V dari yang diinduksi misalnya E). Kami perhatikan bahwa gerakan yang diinduksi oleh GGL ditampilkan dengan arah berlawanan dengan tegangan yang diberikan, yang berlaku dalam kondisi 'motor' yang telah kita diskusikan. Menerapkan hukum *Kirchoff* kita dapat memperoleh persamaan tegangan sebagai berikut:

$$V = E + IR \text{ atau } I = \frac{V-E}{R} \quad (1.21)$$



Gambar 1.15 Rangkaian ekivalen primitif DC motor

dengan mengalikan persamaan 1.21 dengan arus memberikan persamaan daya sebagai berikut

$$\text{input daya elektrik } (VI) = \text{output daya mekanis } (EI) + \text{chopper loss } (I^2R) \text{-(1.22)}$$

(Perhatikan bahwa istilah '*chopper loss*' yang digunakan dalam persamaan 1.22 mengacu pada panas yang dihasilkan oleh arus di belitan: semua kerugian seperti itu di motor listrik disebut dengan cara ini, bahkan ketika konduktor terbuat dari aluminium atau perunggu!)

Layak untuk melihat apa yang dapat dipelajari dari persamaan ini, karena seperti yang telah disebutkan sebelumnya, gambaran 'motor' sederhana ini merangkum semua fitur penting dari motor ril. Pelajaran yang muncul pada tahap ini akan sangat berharga nantinya, ketika kita melihat cara motor yang sebenarnya berperilaku.

Misalnya, jika E lebih kecil dari tegangan yang diberikan oleh V , arus akan positif, dan daya listrik akan mengalir dari sumber, menghasilkan aksi motor. Di sisi lain jika E lebih besar dari V , arus akan kembali ke sumbernya, dan konduktor akan bertindak sebagai generator. Kemampuan bawaan untuk beralih dari motor ke generator tanpa gangguan oleh pengguna adalah properti yang sangat diinginkan dari pengubah energi elektromagnetik. Pengaturan primitif kami hanyalah sebuah mesin yang sama-sama kembali bertindak sebagai motor atau generator.

Poin penting lebih lanjut yang perlu diperhatikan adalah bahwa torsi mekanik (istilah pertama di sisi kanan persamaan 1.22) hanyalah GGL dikalikan dengan arus. Hasil ini sekali lagi berlaku secara universal dan mudah diingat. Kita kadang-kadang harus sedikit berhati-hati jika GGL dan arus tidak sederhana kuantitas DC, tetapi ide dasar ini akan selalu berlaku.

Akhirnya, jelaslah bahwa dalam sebuah motor kita ingin sebanyak mungkin tenaga masukan listrik diubah menjadi daya keluaran mekanis, dan sesedikit mungkin dikonversi menjadi panas dalam konduktor. Karena daya keluaran adalah EI , dan kehilangan panas adalah I^2R , kami melihat bahwa idealnya kami ingin EI jauh lebih besar dari I^2R , atau dengan kata lain E harus jauh lebih besar daripada IR . Dalam rangkaian ekivalen (Gambar 1.15) ini berarti bahwa

sebagian besar tegangan yang diberikan V diperhitungkan oleh GGL (\mathcal{E}), dan hanya sedikit dari tegangan yang diberikan digunakan untuk mengatasi hambatan.

Kondisi Motor

Motor menyiratkan bahwa konduktor bergerak ke arah yang sama dengan gaya elektromagnetik ($B\mathbf{I}$), dan pada kecepatan sedemikian rupa sehingga bagian belakang GGL ($B\mathbf{I}v$) kurang dari tegangan yang diterapkan pada V . Dalam diskusi sejauh ini, kita mengasumsikan bahwa bebannya adalah konstan, sehingga dalam keadaan tunak arusnya sama di semua kecepatan, tegangan dinaikkan dengan kecepatan untuk mengambil akun GGL. Ini adalah pendekatan yang bermanfaat untuk diambil untuk memperoleh hubungan daya yang mapan, tetapi jarang terjadi pada operasi normal. Oleh karena itu kami beralih ke bagaimana konduktor bergerak akan berperilaku dalam kondisi dimana tegangan yang diberikan oleh V adalah konstan, karena ini sesuai lebih erat dengan operasi normal pada motor ril.

Pada bagian selanjutnya, masalah yang lebih rumit tidak dapat dihindari daripada yang kita lihat sejauh ini, karena kita akan memasukkan pertimbangan tentang bagaimana kecepatan motor meningkat dari satu kecepatan ke kecepatan lain, serta apa yang terjadi dalam keadaan tunak. Seperti di semua bidang dinamika, studi tentang perilaku transien motor linear primitif, kami memainkan parameter tambahan seperti massa konduktor (setara dengan inersia motor putar ril) yang tidak ada dalam pertimbangan keadaan tunak.

Perilaku Motor Tanpa Beban Mekanis

Pada bagian ini kami mengasumsikan bahwa berat gantung telah dihilangkan, dan bahwa satu-satunya gaya pada konduktor adalah yang dihasilkan secara elektromagnetik itu sendiri. Minat utama kita adalah pada apa yang menentukan kecepatan tunak dari motor primitif, tetapi kita harus mulai dengan mempertimbangkan apa yang terjadi ketika kita pertama kali menerapkan tegangan.

Dengan konduktor stasioner ketika tegangan V diterapkan, arus akan segera naik ke nilai V/R , karena tidak ada GGL dan satu-satunya hal yang membatasi arus adalah resistensi. (Secara ketat kita harus memberi kemungkinan agar efek induktansi dalam menunda kenaikan arus, tetapi kita memilih untuk mengabaikannya di sini, demi kepentingan kesederhanaan.) Resistansi akan kecil, sehingga arus akan besar, dan oleh karena itu torsi tinggi akan dikembangkan pada konduktor. Oleh karena itu konduktor akan berakselerasi pada kecepatan yang sama dengan gaya yang mngenainya dibagi dengan nilai massanya.

Saat menaikkan kecepatan, GGL (persamaan 1.20) akan naik sebanding dengan kecepatan. Sejak GGL berlawanan dengan tegangan yang diberikan, arus akan turun (persamaan 1.21), sehingga gaya dan akselerasi akan berkurang, meskipun kecepatan akan terus meningkat. Kecepatan akan meningkat

selama ada gaya akselerasi, yaitu selama ada arus dalam konduktor. Kita dapat melihat dari persamaan 1.21 bahwa arus pada akhirnya akan turun ke nol ketika kecepatan mencapai tingkat dimana GGL sama dengan tegangan yang diberikan. Oleh karena itu, kecepatan dan arus bervariasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.16: kedua kurva memiliki bentuk eksponensial yang mencirikan respons sistem yang diatur oleh persamaan diferensial orde pertama. Fakta bahwa arus keadaan tunak adalah nol sesuai dengan pengamatan kami sebelumnya bahwa beban mekanis (dalam hal ini nol) menentukan arus keadaan tunak.

Kami mencatat bahwa dalam situasi ideal ini (di mana tidak ada beban yang diterapkan dan tidak ada gaya gesekan), konduktor akan terus melakukan pergerakan dengan kecepatan konstan, karena tanpa gaya jaring yang bekerja di sana tidak akan ada akselerasi. Tentu saja, tidak ada daya mekanik yang diproduksi, karena kami berasumsi bahwa tidak ada torsi yang berlawanan pada konduktor, dan tidak ada masukan daya karena arus adalah nol. Namun, situasi hipotetis ini berhubungan erat dengan apa yang disebut kondisi 'tanpa-beban' pada motor, satu-satunya perbedaan adalah bahwa motor akan memiliki beberapa gesekan (dan karena itu akan menarik arus kecil), sedangkan di sini kami tidak menganggap gesekan dalam untuk menyederhanakan diskusi ini.

Meskipun tidak ada daya yang diperlukan untuk menjaga konduktor bergerak tanpa gesekan dan tanpa beban saat sudah mencapai kecepatan yang diinginkan, kita harus mencatat bahwa selama seluruh fasa akselerasi tegangan yang diterapkan konstan dan arus masukan turun secara progresif, sehingga masukan daya besar pada awalnya tetapi meruncing karena kecepatan meningkat. Selama masa run-up ini, energi terus dicatu dari sumber: sebagian dari energi ini terbuang sebagai panas dalam konduktor, tetapi sebagian besar disimpan sebagai energi kinetik, dan seperti yang akan kita lihat nanti, energi tersebut dapat dipulihkan.

Mekanisme pengaturan mandiri yang elegan terbukti bekerja di sini. Ketika konduktor dalam keadaan stasioner, ia memiliki gaya tinggi yang bekerja padanya, tetapi gaya ini meruncing ketika kecepatan naik ke nilai targetnya, yang sesuai ke GGL balik (*back e.m.f*) sama dengan tegangan yang diberikan. Melihat kembali ke ekspresi untuk GGL (persamaan 1.18), kita dapat memperoleh ekspresi untuk kecepatan tanpa beban (v_0) dengan menyamakan tegangan yang diberikan dan GGL balik, yang memberikan:

$$E = V = Blv_0, \text{ misal } v_0 = \frac{V}{Bl} \quad (1.23)$$

Persamaan 1.23 menunjukkan bahwa kecepatan tanpa beban keadaan tunak berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, yang menunjukkan bahwa kendali kecepatan dapat dicapai dengan menggunakan tegangan yang diberikan. Kita akan melihat nanti, bahwa salah satu alasan utama mengapa motor DC yang bergoyang di arena kendali kecepatan begitu lama adalah bahwa kecepatan mereka dapat dikendalikan hanya dengan mengendalikan tegangan yang diberikan.

Agak mengejutkan, persamaan 1.23 mengungkapkan bahwa kecepatan berbanding terbalik dengan kerapatan fluks magnetik, yang berarti bahwa semakin lemah medan, maka semakin tinggi kecepatan keadaan tunak. Hasil ini dapat membuat kita terkejut, namun dengan alasan yang bagus. Tentunya, hal ini diperdebatkan, karena gaya yang dihasilkan oleh aksi medan, konduktor tidak akan bergerak secepat jika medan lebih lemah. Pandangan ini salah, tapi bisa dimengerti. Kelemahan dalam argumen adalah menyamakan torsi dengan kecepatan. Ketika tegangan diterapkan pertama kali, gaya pada konduktor akan berkurang jika medan lebih lemah, dan akselerasi awal akan lebih rendah. Tetapi dalam kedua kasus tersebut, percepatan akan berlanjut sampai arus telah jatuh ke nol, dan ini hanya akan terjadi ketika GGL terinduksi telah naik menjadi sama dengan tegangan yang diberikan. Dengan medan yang lebih lemah, kecepatan yang diperlukan untuk menghasilkan GGL ini akan lebih tinggi daripada dengan medan yang kuat: ada 'kurang fluks', jadi apa yang harus dipotong dengan kecepatan lebih tinggi untuk menghasilkan GGL. Masalahnya dirangkum dalam Gambar 1.17, yang menunjukkan bagaimana kecepatan akan naik untuk tegangan yang diberikan, masing-masing untuk medan 'penuh' dan 'setengah'. Perhatikan bahwa akselerasi awal (mis. Kemiringan kurva kecepatan-waktu) dalam wadah setengah-fluks adalah setengah dari kasing-penuh, tetapi kecepatan akhir tetap dua kali lebih tinggi. Pada motor DC ril, teknik mengurangi kerapatan fluks untuk meningkatkan kecepatan dikenal sebagai '*field weakening*' atau 'pelemahan medan'.

Perilaku Motor Dengan Beban Mekanis

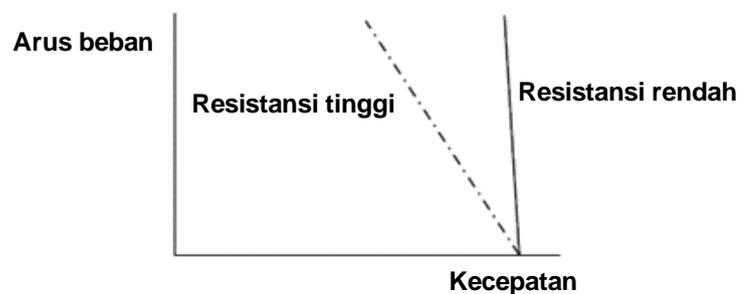
Misalkan, dengan motor linear primitif hingga kecepatan tanpa-bebannya, kami tiba-tiba memasang tali yang membawa beban, sehingga kami sekarang memiliki gaya yang stabil ($T = mg$) yang berlawanan dengan gerakan konduktor. Pada tahap ini tidak ada arus dalam konduktor dan dengan demikian satu-satunya torsi yang mengenainya adalah T . Konduktor akan mulai melambat. Namun begitu kecepatan turun, bagian **GGL balik** akan menjadi kurang dari V , dan arus akan mulai mengalir ke konduktor untuk menghasilkan gaya penggerak elektromagnetik. Semakin banyak kecepatan turun, maka semakin besar arus, oleh karenanya semakin besar gaya yang dikembangkan oleh konduktor. Ketika gaya yang dikembangkan oleh konduktor menjadi sama dengan beban (T), deselerasi akan berhenti, dan kondisi keseimbangan baru akan tercapai. Kecepatan akan lebih rendah daripada tanpa-beban, dan konduktor sekarang akan menghasilkan daya keluaran mekanik kontinu, yaitu bertindak sebagai motor.

Karena gaya elektromagnetik pada konduktor berbanding lurus dengan arus, maka arus tunak berbanding lurus dengan beban yang diterapkan, seperti yang kita lihat sebelumnya. Jika kita mengeksplorasi perilaku transien secara matematis, kita akan menemukan bahwa penurunan kecepatan mengikuti respons eksponensial orde pertama yang sama yang kita lihat pada periode run-up. Sekali lagi sifat kendali diri terlihat jelas, yaitu ketika beban diterapkan, maka kecepatan turun cukup untuk memungkinkan arus yang cukup mengalir untuk menghasilkan gaya yang diperlukan

untuk menyeimbangkan beban. Kami hampir tidak bisa mengharapkan sesuatu yang lebih baik dalam hal kinerja, namun konduktor melakukannya tanpa ada intervensi eksternal dari pihak kami. Pembaca yang akrab dengan sistem kendali kalang tertutup mungkin akan mengenali bahwa alasan untuk kinerja yang sangat baik ini adalah, bahwa motor primitif memiliki umpan balik kecepatan negatif yang melekat melalui GGL.

Kembali ke persamaan 1.21, kami mencatat bahwa arus tergantung langsung pada perbedaan antara nilai V dan E , dan berbanding terbalik pada hambatan. Oleh karena itu untuk resistansi yang diberikan, semakin besar beban (dan karenanya arus keadaan tunak), semakin besar perbedaan yang diperlukan antara V dan E , dan karenanya semakin rendah kecepatan kondisi tunak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.18.

Kita juga dapat melihat dari persamaan 1.21 bahwa semakin tinggi resistansi konduktor, motor akan semakin melambat ketika beban yang diberikan diterapkan. Sebaliknya, semakin rendah resistansi, semakin konduktor mampu menahan kecepatan tanpa-bebannya di hadapan beban yang diberikan. Ini juga diilustrasikan pada Gambar 1.18. Kita dapat menyimpulkan bahwa satu-satunya cara kita dapat memperoleh kecepatan yang benar-benar konstan dengan motor jenis ini adalah agar tahanan konduktor menjadi nol, yang tentu saja tidak mungkin. Namun demikian, motor DC ril umumnya memiliki hambatan yang kecil, dan kecepatannya tidak turun banyak ketika beban diterapkan-karakteristik untuk sebagian besar aplikasi yang sangat diinginkan.



Gambar 1.18 Pengaruh resistensi pada kemampuan motor untuk mempertahankan kecepatan saat beban diterapkan

Kami menyelesaikan eksplorasi kinerja saat diberikan beban, dengan menanyakan bagaimana kerapatan fluks memengaruhi perilaku. Mengingat bahwa gaya elektromagnetik sebanding dengan kerapatan fluks serta arus, kita dapat menyimpulkan bahwa untuk mengembangkan gaya yang diberikan, arus yang dibutuhkan akan lebih tinggi dengan fluks yang lemah daripada dengan yang kuat. Oleh karena itu mengingat kenyataan bahwa akan selalu ada batas atas pada arus yang dapat dibawa oleh konduktor dengan aman, gaya maksimum yang dapat dikembangkan akan bervariasi dalam proporsi langsung dengan kerapatan fluks, dengan fluks yang lemah mengarah ke torsi

maksimum yang rendah dan sebaliknya. Ini menggarisbawahi pentingnya pengoperasian dengan kerapatan fluks maksimum bila memungkinkan.

Kita juga dapat melihat kerugian lain dari memiliki kerapatan fluks rendah dengan mencatat bahwa untuk mencapai gaya yang diberikan, penurunan kecepatan akan sangat tinggi ketika kita beralih ke kerapatan fluks yang lebih rendah. Kita dapat melihat ini dengan membayangkan bahwa kita menginginkan torsi tertentu, dan mempertimbangkan bagaimana kita mencapainya. Pertama dengan fluks penuh dan kedua dengan setengah fluks. Dengan fluks penuh, akan ada penurunan kecepatan tertentu yang menyebabkan GGL cukup jatuh untuk mengakui arus yang diperlukan. Tetapi dengan setengah fluks, misalnya, arus dua kali lebih banyak dibutuhkan untuk mengembangkan gaya yang sama. Oleh karena itu, GGL harus turun dua kali lipat dibandingkan dengan fluks penuh. Namun, karena kerapatan fluks sekarang hanya setengah, penurunan kecepatan harus empat kali lebih besar dari itu dengan fluks penuh. Karenanya, 'motor setengah-fluks' memiliki karakteristik beban dengan gradien beban/kecepatan empat kali lebih buruk dibandingkan dengan fluks penuh. Ini ditunjukkan pada Gambar 1.19; tegangan yang diterapkan telah disesuaikan sehingga dalam kedua kasus kecepatan tanpa beban adalah sama. Motor setengah-fluks jelas lebih rendah dalam hal kemampuannya menahan kecepatan yang disetel ketika beban diterapkan.

Kita mungkin tergoda untuk berpikir bahwa kecepatan yang lebih tinggi yang dapat kita peroleh dengan mengurangi fluks, entah bagaimana membuat kinerja yang lebih baik, tetapi kita sekarang dapat melihat bahwa ini tidak terjadi. Dengan membagi dua fluks misalnya, kecepatan tanpa beban untuk tegangan yang diberikan berlipat dua, tetapi ketika beban dinaikkan hingga arus pengenal mengalir dalam konduktor, gaya yang dikembangkan hanya setengah, sehingga daya mekanisnya sama. Kami benar-benar mempromosikan bahwa kecepatan berlawanan dengan torsi, dan tidak ada saran untuk mendapatkan sesuatu secara gratis.

Besaran V dan E relatif dan efisiensi

Kami selalu menginginkan mesin yang memiliki efisiensi tinggi. Dari persamaan 1.20, kita melihat bahwa untuk mencapai efisiensi tinggi, *chopper loss* (I^2R) harus lebih kecil dibandingkan dengan torsi mekanik (EI), yang berarti bahwa drop tegangan resistif dalam konduktor (IR) harus lebih kecil dibandingkan dengan GGL yang diinduksi (E) atau tegangan yang diberikan (V). Dengan kata lain kami ingin sebagian besar tegangan yang diterapkan diperhitungkan oleh pergerakan GGL, daripada drop tegangan yang sia-sia pada kawat. Karena pergerakan GGL sebanding dengan kecepatan, dan penurunan tegangan resistif tergantung pada resistansi konduktor, kita melihat bahwa konverter energi yang baik membutuhkan resistansi konduktor serendah mungkin dan kecepatan setinggi mungkin.

Untuk memberikan kesan bagi jenis angka yang mungkin ditemui, kita dapat mempertimbangkan konduktor dengan tahanan 0.5 V, membawa arus 4 A, dan bergerak dengan kecepatan sedemikian rupa sehingga GGL adalah 8 V. Dari persamaan 1.19, tegangan catu diberikan oleh:

$$V = E + IR = 8 + (4 \times 0.5) = 10 \text{ volts}$$

Oleh karena itu masukan daya listrik (VI) adalah 40 watt, daya keluaran mekanik (EI) adalah 32 watt, dan *Chopper loss* (I^2R) adalah 8 watt, memberikan efisiensi sebesar 80%.

Namun, jika tegangan catu berlipat ganda (mis. $V = 20$ volt), dan gaya penahan diasumsikan tetap sama (sehingga arus keadaan tunak masih 4 A), pergerakan GGL diberikan oleh persamaan 1.19 sebagai:

$$E = 20 - (4 \times 0.5) = 18 \text{ volts}$$

yang menunjukkan bahwa kecepatan akan lebih dari dua kali lipat, seperti yang diharapkan. Masukan daya listrik sekarang 80 watt, daya keluaran mekanis 72 watt, dan *Chopper loss* masih 8 watt. Efisiensi sekarang telah meningkat menjadi 90%, hal tersebut menggarisbawahi fakta bahwa proses konversi energi menjadi lebih baik pada kecepatan yang lebih tinggi.

Situasi ideal jelas adalah di mana ketika IR dalam persamaan 1.19 diabaikan, sehingga nilai GGL balik sama dengan tegangan yang diberikan. Kami kemudian akan memiliki mesin yang ideal dengan efisiensi 100%, di mana kecepatan keadaan tunak akan berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan dan tidak tergantung pada beban.

Dalam praktiknya, sejauh mana kita dapat mendekati situasi ideal yang dibahas di atas tergantung pada ukuran mesin. Motor kecil, seperti yang digunakan dalam jam tangan, sangat buruk, karena sebagian besar tegangan yang digunakan habis untuk mengatasi hambatan konduktor, dan pergerakan GGL sangat kecil: motor-motor ini jauh lebih baik dalam menghasilkan panas daripada menghasilkan keluaran daya mekanis. Mesin-mesin kecil, seperti yang digunakan pada perkakas jam tangan, jauh lebih baik dengan GGL terhitung mungkin 70–80% dari tegangan yang diberikan. Mesin-mesin industri jauh lebih baik: yang terbesar (dari ratusan kW) hanya menggunakan satu atau dua persen dari tegangan yang diterapkan dalam mengatasi resistensi, dan karenanya motor besar memiliki efisiensi yang sangat tinggi.

Analisis motor primitif- kesimpulan

Semua pelajaran yang dipetik dari melihat motor primitif akan menemukan langsung di hampir semua motor yang kita lihat dalam sisa buku ini, jadi ada baiknya mengingatkan diri kita sendiri tentang poin-poin penting tersebut.

Pertama, kita akan sering merujuk pada rumus untuk gaya (F) pada konduktor dalam medan magnet, misal:

$$F = BIl \quad (1.24)$$

dan ke rumus untuk gerakan yang diinduksi GGL (E), yaitu:

$$E = Blv \quad (1.25)$$

di mana B adalah kerapatan fluks magnet, I adalah arus, l adalah panjang konduktor dan v adalah kecepatan yang tegak lurus terhadap medan. Persamaan-persamaan ini membentuk fondasi teoritis yang menjadi dasar pemahaman kita tentang motor.

Kedua, kita telah melihat bahwa kecepatan motor primitif berjalan ditentukan oleh tegangan yang diberikan, sedangkan arus yang ditarik motor ditentukan oleh beban mekanis. Hasil yang persis sama akan berlaku ketika kita memeriksa motor DC dan hubungan yang sangat mirip juga akan muncul ketika kita melihat motor induksi.

1.8 PROPERTI UMUM PADA MOTOR LISTRIK

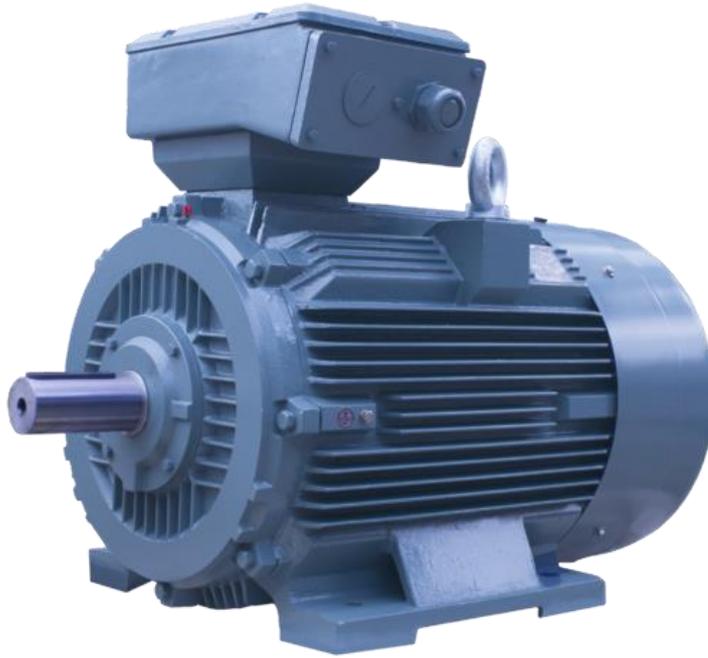
Semua motor listrik diatur oleh hukum elektromagnetisme, dan pada dasarnya tunduk pada kendala yang sama yang dikenakan oleh bahan (tembaga dan besi) dari mana mereka dibuat. Karena itu, kita tidak perlu heran bahwa pada tingkat dasar semua motor, terlepas dari jenisnya, tetap memiliki banyak kesamaan.

Sifat-sifat umum ini, yang sebagian besar telah disinggung dalam bab ini, biasanya tidak menonjol. Buku-buku yang ada cenderung berkonsentrasi pada perbedaan antara jenis-jenis motor dan pabrikan biasanya lebih tertarik untuk mempromosikan keutamaan khusus dari motor mereka, dengan mengorbankan persaingan. Penekanan yang memecah belah ini menyebabkan persatuan yang mendasari dikaburkan, meninggalkan pengguna dengan sedikit kesempatan untuk menyerap jenis pengetahuan yang akan membekali mereka untuk membuat penilaian berdasarkan informasi.

Ide-ide paling berguna yang perlu diingat karena itu diberikan di bawah ini, dengan catatan singkat masing-masing. Pengalaman menunjukkan bahwa pengguna yang memiliki ide-ide dasar ini dengan kuat dalam pikiran akan menemukan diri mereka dapat memahami mengapa satu motor tampak lebih baik daripada yang lain, dan akan merasa jauh lebih percaya diri ketika dihadapkan pada tugas yang sulit dalam menimbang pro dan kontra dari jenis yang bersaing.

Suhu dan pendinginan pengoperasian

Pengaturan pendinginan adalah faktor terpenting dalam menentukan keluaran dari motor apa pun.



Plat 1.2 Motor induksi rangka rangka baja, 150 kW (201 h.p.), 1485 putaran / menit. Bagian aktif benar-benar tertutup, dan pendinginan disediakan melalui kipas internal yang mensirkulasi udara pendingin di sekitar bagian dalam motor melalui rusuk berongga, dan kipas eksternal yang meniupkan udara ke case. (Foto oleh Brook Crompton.)

Motor apa pun akan memberikan lebih banyak daya jika rangkaian listriknya bekerja lebih keras (yaitu jika arus dibiarkan meningkat). Faktor pembatas biasanya adalah kenaikan suhu yang dimungkinkan dari belitan yang tergantung pada kelas insulasi.

Untuk isolasi kelas F (yang paling banyak digunakan) kenaikan suhu yang diizinkan adalah 100 K, sedangkan untuk kelas H adalah 125 K. Jadi jika pendinginan tetap sama, lebih banyak keluaran dapat diperoleh hanya dengan menggunakan isolasi bermutu tinggi. Atau, dengan insulasi yang diberikan, keluaran dapat ditingkatkan jika sistem pendingin ditingkatkan. Sebagai contoh, motor dengan ventilasi berlebih mungkin memberikan daya keluaran dua kali lipat dari mesin yang identik tetapi tertutup seluruhnya.

Torsi per satuan volume

Untuk motor dengan sistem pendingin yang serupa, torsi kira-kira akan sebanding dengan volume rotor, yang pada gilirannya kira-kira sebanding dengan volume motor keseluruhan.

Ini berasal dari fakta bahwa untuk pengaturan pendinginan yang diberikan, pemuatan spesifik dan magnetik mesin dari berbagai jenis kurang lebih sama. Torsi per satuan panjang karena itu tergantung pertama dan terutama pada kuadrat diameter, sehingga motor dengan diameter dan panjang yang hampir sama dapat diharapkan untuk menghasilkan torsi yang hampir sama pula.

Daya per satuan volume-pentingnya kecepatan

Daya keluaran per satuan volume berbanding lurus dengan kecepatan.

Motor berkecepatan rendah tidak menarik karena besar dan juga mahal. Biasanya lebih baik menggunakan motor berkecepatan tinggi dengan pengurangan kecepatan mekanis. Misalnya, motor penggerak langsung untuk obeng listrik portabel akan menjadi hal yang tidak masuk akal.

Efek ukuran-torsi dan efisiensi spesifik

Motor besar memiliki torsi spesifik yang lebih tinggi (torsi per satuan volume) dan lebih efisien daripada motor yang kecil.

Pada motor besar pemuatan listrik spesifik biasanya jauh lebih tinggi daripada yang kecil, dan pemuatan magnetik spesifik menjadi lebih tinggi. Dua faktor ini bergabung untuk memberikan torsi spesifik yang lebih tinggi.

Motor sangat kecil secara inheren sangat tidak efisien (mis. 1% dalam arloji), sedangkan motor dengan lebih dari 100 kW memiliki efisiensi di atas 95%. Alasan untuk efek skala ini rumit, tetapi berasal dari fakta bahwa istilah drop tegangan resistansi dapat dibuat relatif kecil pada perangkat elektromagnetik besar, sedangkan pada yang kecil resistansi menjadi istilah yang dominan.

Efisiensi dan kecepatan

Efisiensi motor meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan.

Untuk torsi tertentu, keluaran daya naik dalam proporsi langsung ke kecepatan, sementara kerugian listrik secara umum adalah konstan. Dalam kondisi ini, efisiensi meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan

Nilai tegangan

Motor dapat disediakan untuk memenuhi tegangan apa pun.

Dalam batas selalu dimungkinkan untuk memundurkan motor untuk tegangan yang berbeda tanpa mempengaruhi kinerjanya. Motor 200 V, 10 A dapat digulung ulang untuk motor 100 V, 20 A hanya dengan menggunakan setengah belitan per kumparan kawat yang memiliki dua kali luas penampang. Jumlah total bahan aktif, dan karenanya kinerja motor akan sama.

Overload jangka pendek

Sebagian besar motor dapat kelebihan beban untuk waktu yang singkat tanpa kerusakan.

Pembebanan listrik kontinu (yaitu arus) tidak dapat dilampaui tanpa merusak insulasi, tetapi jika motor telah berjalan dengan arus yang dikurangi untuk beberapa waktu, maka arus (dan torsi) yang diizinkan akan jauh lebih besar daripada kondisi normal untuk waktu yang singkat. Faktor utama yang memengaruhi besaran dan durasi kelebihan beban yang diizinkan adalah konstanta waktu-termal (yang mengatur laju kenaikan suhu) dan pola operasi sebelumnya. Konstanta waktu termal berkisar dari beberapa detik untuk motor kecil hingga beberapa menit atau bahkan berjam-jam untuk motor besar. Pola pengoperasian jelas sangat bervariasi, jadi daripada bergantung pada pola tertentu yang diikuti, biasanya motor dilengkapi dengan alat pelindung suhu berlebih (misalnya termistor) yang memicu alarm dan atau menyebabkan trip catu daya jika suhu aman terlampaui.

Soal Latihan

1. Arus dalam kumparan dengan 250 putaran adalah 8 A. Hitunglah besar MMF!
2. Koil dalam (1) digunakan dalam rangkaian magnetik dengan penampang seragam yang terbuat dari besi magnetik berkualitas baik dan dengan celah udara sebesar 2 mm. Perkirakan kerapatan fluks di celah udara dan di besi.

$$(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$$

Bagaimana jawaban akan berubah jika luas penampang rangkaian magnetik digandakan, dengan semua parameter lainnya tetap sama?

3. Hitung fluks dalam rangkaian magnetik yang memiliki luas penampang 18 cm² ketika kerapatan fluks adalah 1,4 T.
4. Rangkaian magnetik dengan luas penampang seragam memiliki dua celah udara masing-masing 0,5 dan 1 mm. Belitan yang menarik menyediakan MMF dari 1200 Amp-putaran. Perkirakan MMF di setiap celah udara dan kerapatan fluks.
5. Belitan medan dalam motor mengkonsumsi 25 W ketika menghasilkan kerapatan fluks 0,4 T pada permukaan kutub. Perkirakan daya saat kerapatan fluks permukaan-tiang = 0,8 T.
6. Rotor motor DC memiliki diameter asli 30 cm dan celah udara di bawah kutub = 2 mm. Selama perbaikan, diameter rotor secara tidak sengaja terbentuk kembali dan kemudian berukuran kurang dari 0,5 mm. Perkirakan berapa banyak medan MMF harus ditingkatkan untuk mengembalikan kinerja normal. Bagaimana MMF tambahan disediakan?

7. Perkirakan luas penampang minimum rangkaian magnetik yang harus membawa fluks 5 mWb. (Jangan khawatir jika Anda berpikir bahwa pertanyaan ini tidak dapat dijawab tanpa informasi lebih lanjut-Anda benar.)
8. Hitung gaya elektromagnetik pada:
 - sebuah konduktor tunggal dengan panjang 25 cm, membawa arus 4 A, terpapar dengan kerapatan fluks magnetik 0,8 T tegak lurus terhadap panjangnya.
 - sisi kumparan yang terdiri dari dua puluh kabel dengan panjang 25 cm, masing-masing membawa arus 2 A, terpapar dengan kerapatan fluks magnetik 0,8 T yang tegak lurus terhadap panjangnya.
9. Perkirakan torsi yang dihasilkan oleh salah satu mesin awal yang diilustrasikan pada Gambar 1.11 dengan mengingat hal berikut: rata-rata kerapatan fluks celah udara di bawah permukaan-kutub = 0,4 T; kutub-busur sebagai persentase dari total keliling = 75%; panjang rotor aktif = 50 cm; diameter rotor = 30 cm; diameter dalam tiang stator = 32 cm; jumlah total konduktor rotor = 120; arus di setiap konduktor rotor = 50 A.
10. Desainer motor sering merujuk pada 'kerapatan fluks rata-rata di atas permukaan rotor'. Apa yang sebenarnya mereka maksud? Jika kita ingin menjadi benar-benar hebat, apa yang akan menjadi rata-rata kerapatan fluks di atas permukaan rotor (keseluruhan)?
11. Jika kumparan medan motor digulung ulang untuk beroperasi pada 220 V, bukan pada 110 V, bagaimana belitan baru dibandingkan dengan yang lama dalam hal jumlah belitan, diameter kawat, konsumsi daya, dan ukuran fisik?
12. Katalog alat-alat listrik rumah tangga menunjukkan bahwa sebagian besar tersedia dalam versi 240 V atau 110 V. Perbedaan apa yang anda harapkan dari segi penampilan, ukuran, berat, dan kinerjanya?
13. Mengingat bahwa belitan medan motor tidak berkontribusi pada daya keluaran mekanik, namun mengapa hal tersebut mengkonsumsi daya secara terus menerus?
14. Untuk daya yang diberikan, mana yang lebih besar, motor atau generator?
15. Jelaskan secara singkat mengapa penggerak listrik berkecepatan rendah sering menggunakan motor berkecepatan tinggi dan mengapa beberapa bentuk pengurangan kecepatan dilakukan secara mekanis, daripada menggerakkan motor secara langsung.

2 KONVERTER ELEKTRONIKA DAYA UNTUK KENDALI MOTOR

2.1 PENGANTAR

Dalam bab ini kita melihat contoh-contoh rangkaian konverter daya yang digunakan dalam pengendalian motor, memberikan salah satu keluaran dari DC atau AC, dan bekerja dari DC (baterai), atau dari AC listrik konvensional. Perawatan ini tidak dimaksudkan untuk menjadi lengkap, tetapi harus berfungsi untuk menyoroti aspek paling penting yang umum untuk semua jenis konverter drive.

Meskipun ada banyak jenis konverter, semua konverter kecuali yang berdaya sangat rendah didasarkan pada beberapa bentuk sakelar elektronik. Kebutuhan untuk mengadopsi strategi switching ditekankan dalam contoh pertama, dimana konsekuensinya dieksplorasi secara mendalam. Kita akan melihat bahwa switching sangat penting untuk mencapai konversi daya efisiensi tinggi, tetapi bentuk gelombang yang dihasilkan pasti kurang ideal dari sudut pandang motor.

Contoh-contoh telah dipilih untuk menggambarkan praktik yang umum, jadi untuk setiap konverter, perangkat switching yang paling umum digunakan (mis. Tiristor, transistor) ditunjukkan. Dalam banyak kasus, beberapa perangkat switching yang berbeda mungkin cocok (lihat nanti), jadi kita tidak boleh mengidentifikasi rangkaian tertentu sebagai perlindungan eksklusif dari perangkat tertentu.

Sebelum membahas rangkaian tertentu, akan bermanfaat untuk melihat keseluruhan sistem penggerak tipikal, sehingga peran konverter dapat dilihat dalam konteks yang tepat.

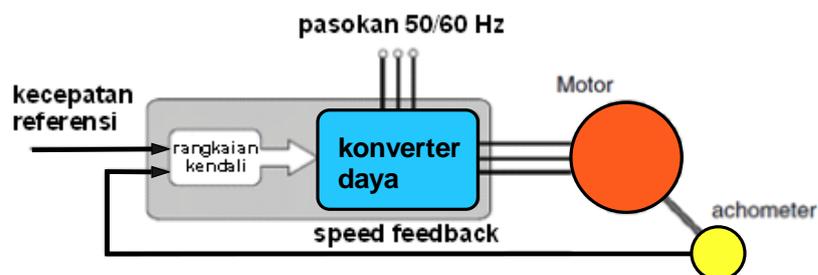
Pengaturan Umum Pengendali

Sistem penggerak lengkap ditunjukkan dalam bentuk diagram blok pada Gambar 2.1.

Tugas konverter adalah untuk menarik energi listrik dari listrik (pada motor pada tegangan dan frekuensi apa pun yang diperlukan untuk mencapai keluaran mekanik yang diinginkan.)

Kecuali dalam konverter yang paling sederhana (seperti penyearah dioda sederhana), biasanya ada dua bagian yang berbeda pada konverter. Yang pertama adalah tahap daya, di mana energi mengalir ke motor, dan yang kedua adalah bagian kendali, yang mengatur aliran daya. Sinyal kendali, dalam bentuk analog daya rendah atau tegangan digital, beri tahu konverter apa yang seharusnya dilakukan, sementara sinyal umpan balik daya rendah lainnya digunakan untuk mengukur apa yang sebenarnya terjadi. Dengan membandingkan sinyal permintaan dan umpan balik, dan menyesuaikan keluaran sesuai, keluaran target dipertahankan. Pengaturan sederhana yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 hanya memiliki satu masukan yang mewakili kecepatan yang diinginkan, dan satu sinyal umpan balik yang menunjukkan kecepatan aktual, tetapi sebagian besar drive akan memiliki sinyal umpan balik tambahan seperti yang akan kita lihat nanti. Hampir semua drive menggunakan kendali loop tertutup (umpan balik), sehingga pembaca yang tidak terbiasa dengan prinsip-prinsip dasar mungkin merasa terbantu untuk membaca Apendiks pada tahap ini.

Karakteristik konverter elektronik daya yang digunakan bersama dengan sebagian besar sistem kelistrikan adalah bahwa mereka memiliki kapasitas yang sangat kecil untuk menyimpan energi. Ini berarti bahwa setiap perubahan mendadak pada daya yang dicatu oleh konverter ke motor harus tercermin dalam peningkatan tiba-tiba dalam daya yang ditarik dari pasokan. Dalam kebanyakan kasus ini bukan masalah serius, tetapi memiliki dua kelemahan. Pertama, peningkatan arus yang tiba-tiba diambil dari catu akan menyebabkan penurunan tegangan catu sesaat, karena efek dari impedansi catu. Tegangan 'paku' ini akan muncul sebagai distorsi yang tidak diinginkan ke pengguna lain pada pasokan yang sama. Dan kedua, mungkin ada penundaan yang diberlakukan sebelum pasokan dapat memberikan daya ekstra. Dengan p daya satu fasa, misalnya, tidak akan ada peningkatan tiba-tiba daya dari catu pada saat di mana tegangan listrik adalah nol, karena daya sesaat tentu nol pada titik ini dalam siklus karena tegangan itu sendiri nol.



Gambar 2.1 Pengaturan umum dari kendali kecepatan motor

Akan lebih baik jika sejumlah besar energi dapat disimpan dalam konverter itu sendiri: permintaan energi jangka pendek kemudian dapat dipenuhi secara instan, sehingga mengurangi fluktuasi cepat dalam daya yang diambil dari listrik. Tetapi sayangnya ini tidak ekonomis: sebagian besar konverter memiliki simpanan energi yang kecil di induktor dan kapasitor mereka, tetapi jumlahnya tidak cukup untuk menyangga pasokan secukupnya untuk melindunginya dari apa pun selain fluktuasi jangka pendek.

2.2 KENDALI TEGANGAN-KELUARAN DC DARI CATU DAYA DC

Dengan alasan penyederhanaan kita akan mulai dengan mengeksplorasi masalah pengendalian tegangan pada beban resistif 2 V, diumpankan dari sumber tegangan konstan 12 V seperti baterai. Tiga metode yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.2, dimana lingkaran di sebelah kiri merepresentasikan sumber DC 12 V yang ideal, ujung panah menunjukkan terminal positif. Meskipun pengaturan ini tidak persis sama seperti jika bebannya adalah motor DC, kesimpulan yang kita gambar kurang lebih sama.

Metode (a) menggunakan resistor variabel (R) untuk menyerap fraksi apa pun dari tegangan baterai yang tidak diperlukan pada beban. Ini memberikan kendali yang halus (meskipun manual) pada rentang penuh dari tanggapan 0 hingga 12 V, tetapi permasalahannya adalah daya yang terbuang dalam resistor kendali. Misalnya, jika tegangan beban harus dikurangi menjadi 6 V, resistor (R) harus diatur ke 2 V, sehingga setengah dari tegangan baterai dijatuhkan pada R . Arus akan menjadi 3 A, daya beban akan menjadi 18 W, dan daya yang dihaburkan dalam R juga akan menjadi 18 W. Dalam hal efisiensi konversi daya secara keseluruhan (yaitu daya yang berguna dikirim ke beban dibagi dengan daya total dari sumber) efisiensi adalah 50%, ini berarti efisiensinya sangat buruk. Jika R ditingkatkan lebih jauh, efisiensi akan turun menjadi lebih rendah, mendekati nol karena tegangan beban cenderung mendekati nol. Metode kendali ini tidak dapat diterima untuk kendali motor, kecuali mungkin dalam aplikasi daya rendah seperti model mobil balap (RC).

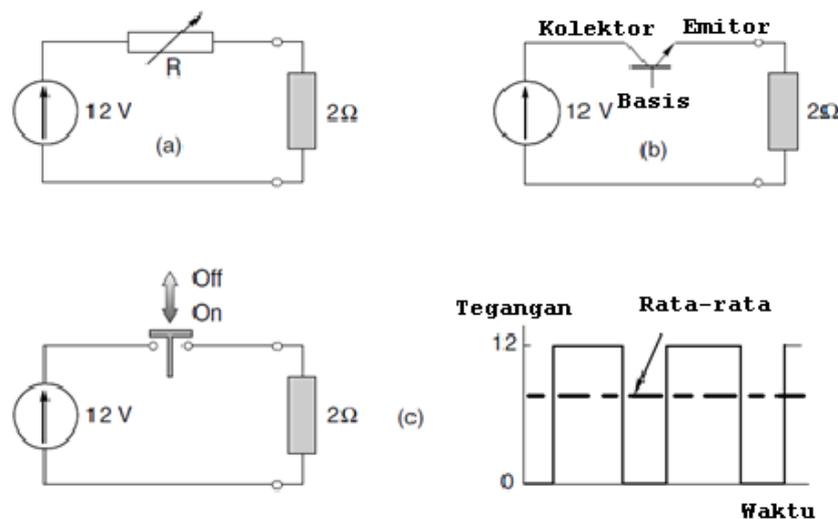
Metode (b) hampir sama dengan (a) kecuali transistor digunakan sebagai pengganti resistor variabel yang dioperasikan secara manual. Transistor pada Gambar 2.2 (b) dihubungkan dengan terminal kolektor dan emitor secara seri dengan sumber tegangan dan resistor beban. Pada dasarnya transistor adalah resistor variabel, tetapi yang agak istimewa dimana resistensi kolektor-emitor yang efektif dapat dikendalikan pada rentang yang luas melalui arus basis-emitor. Arus basis-emitor biasanya sangat kecil, sehingga dapat divariasikan dengan menggunakan rangkaian elektronik berdaya rendah (tidak ditunjukkan pada Gambar 2.2) yang kerugiannya dapat diabaikan dibandingkan dengan daya di rangkaian utama (kolektor-emitor).

Metode (b) berbagi kelemahan dari metode (a) di atas, yaitu efisiensinya yang sangat rendah. Tetapi yang lebih serius lagi menyangkut kendali daya, daya 'terbuang' (hingga maksimum 18 W dalam kasus ini) dibakar di dalam transistor, yang karenanya harus besar, didinginkan dengan baik

dan mahal. Transistor tidak pernah dioperasikan dengan cara 'linier' ketika digunakan dalam aplikasi elektronika daya, tetapi banyak digunakan sebagai sakelar, seperti yang dibahas di bawah ini.

Kendali Penyaklaran

Gagasan dasar yang mendasari regulator daya switching ditunjukkan oleh pengaturan pada Gambar 2.2 (c), yang menggunakan sakelar mekanis. Dengan mengoperasikan sakelar secara berulang dan memvariasikan rasio waktu on/off, tegangan beban rata-rata dapat bervariasi secara kontinu antara 0 V (mati sepanjang waktu) hingga 6 V (sakelar on dan off untuk setengah dari setiap siklus) hingga 12 V (aktif sepanjang waktu).



Gambar 2.2 Metode untuk memperoleh keluaran tegangan variabel dari sumber tegangan konstan

Keuntungan utama dari rangkaian chopper adalah tidak ada daya yang terbuang sehingga efisiensinya mencapai 100%. Ketika sakelar hidup, arus akan mengalir melaluinya, tetapi tegangan yang melewatinya adalah nol, karena resistansinya dapat diabaikan. Karena itu, daya yang hilang pada sakelar adalah nol. Demikian juga, ketika sakelar 'mati' arus yang melewatinya adalah nol, jadi meskipun tegangan pada sakelar adalah 12 V, daya yang hilang di dalamnya adalah nol juga.

Kerugian yang jelas adalah bahwa tanpa imajinasi dapat dilihat tegangan DC yang 'baik': alih-alih itu terdiri dari tingkat rata-rata atau 'DC', dengan komponen 'AC' yang dilapiskan secara *superimposed*. Ingatlah bahwa kami benar-benar ingin beban adalah motor DC, daripada resistor, kita pasti bertanya apakah tegangan denyut akan diterima. Untungnya, jawabannya adalah ya, asalkan frekuensi memotong cukup tinggi. Kita akan melihat nanti bahwa induktansi motor menyebabkan arus jauh lebih lancar daripada tegangan, yang berarti bahwa torsi motor berfluktuasi jauh lebih sedikit daripada yang kita perkirakan, dan inersia mekanis (*moment inertia*) motor menyaring riak torsi sehingga kecepatan tetap konstan, pada nilai yang diatur oleh level rata-rata (atau DC) dari gelombang pencacah.

Jelas saklar mekanik tidak cocok, dan tidak bisa diharapkan untuk bertahan lama ketika berdenyut pada frekuensi yang tinggi. Jadi, saklar elektronika daya digunakan sebagai penggantinya. Yang pertama dari banyak perangkat yang akan digunakan untuk switching adalah *bipolar junction transistor* (BJT), jadi kita akan mulai dengan memeriksa bagaimana perangkat tersebut digunakan dalam rangkaian *chopper*. Jika kita memilih perangkat yang berbeda, seperti transistor efek medan semikonduktor oksida logam (MOSFET) atau transistor bipolar gerbang terisolasi (IGBT), pengaturan terperinci untuk menghidupkan dan mematikan perangkat akan berbeda (lihat Bagian 2.5), tetapi kesimpulan utama yang kami buat akan sama.

Transistor Chopper

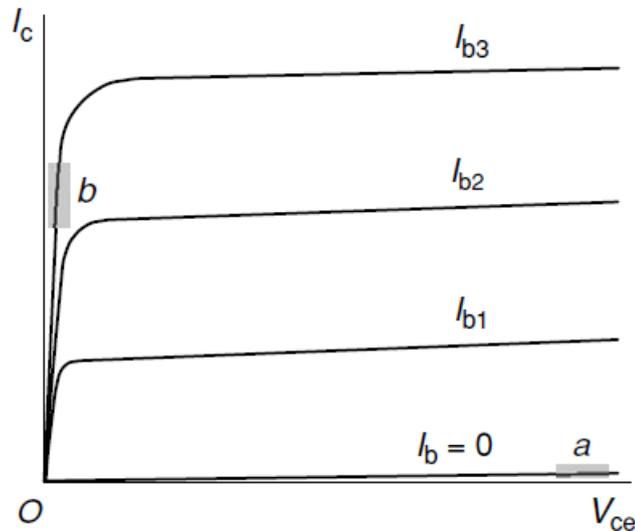
Seperti disebutkan sebelumnya, transistor secara efektif adalah resistor yang dapat dikendalikan, yaitu resistensi antara kolektor dan emitor tergantung pada arus di persimpangan basis-emitor. Untuk meniru pengoperasian sakelar mekanis, transistor harus dapat memberikan resistansi tak terbatas (sesuai dengan sakelar terbuka) atau resistansi nol (sesuai dengan sakelar tertutup). Tidak satu pun dari kondisi ideal ini dapat dicapai dengan transistor ril, tetapi keduanya dapat diperkirakan.

Transistor akan 'mati' ketika arus basis-emitor = nol. Dilihat dari rangkaian utama (kolektor-emitor), resistansinya akan sangat tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh wilayah Oa pada Gambar 2.3.

Di bawah kondisi 'cut-off' ini, hanya arus kecil (I_c) yang dapat mengalir dari kolektor ke emitor, terlepas dari tegangan (V_{ce}) antara kolektor dan emitor. Oleh karena itu, daya yang hilang di perangkat akan diabaikan, memberikan perkiraan yang sangat baik untuk sakelar terbuka.

Untuk menghidupkan transistor sepenuhnya 'on', arus basis-emitor harus disediakan. Arus basis yang diperlukan akan tergantung pada prospektif arus kolektor-emitor, yaitu arus dalam beban. Tujuannya adalah untuk menjaga transistor 'jenuh' sehingga memiliki resistansi yang sangat rendah, sesuai dengan wilayah Ob pada Gambar 2.3. Dalam contoh yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, jika resistansi transistor sangat rendah, arus dalam rangkaian akan mencapai hampir 6 A, jadi kita harus memastikan bahwa arus basis-emitor cukup besar untuk memastikan bahwa transistor tetap dalam kondisi jenuh ketika $I_c = 6$ A.

Biasanya dalam transistor bipolar (BJT) arus basis harus berkisar antara 5-10% dari arus kolektor untuk menjaga transistor tetap berada di daerah saturasi: sebagai contoh (Gambar 2.2), dengan arus beban penuh 6 A yang mengalir, arus basis yang mungkin adalah 400 mA, tegangan emitor kolektor mungkin sekitar 0,33 V, memberikan disipasi pada keadaan 2 W dalam transistor ketika daya beban 72 W. Efisiensi konversi daya tidak mencapai 100%, meskipun dengan saklar yang ideal, tetapi itu masih dapat diterima.



Gambar 2.3 Karakteristik transistor yang menunjukkan daerah Oa dengan resistensi tinggi (cut-off) dan daerah resistansi rendah (saturasi) Ob. Status operasi 'nonaktif' dan 'aktif' ditunjukkan oleh masing-masing area a dan b yang diarsir

Kita harus mencatat bahwa tegangan emitor basis-negara sangat rendah, yang, ditambah dengan arus basis kecil, berarti bahwa daya yang diperlukan untuk menggerakkan transistor jauh lebih sedikit daripada daya yang dihidupkan dalam rangkaian kolektor-emitor. Namun demikian, untuk mengganti transistor dalam pola reguler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, kita jelas membutuhkan gelombang arus basis yang menyala dan mati secara berkala, dan kita mungkin bertanya-tanya bagaimana kita mendapatkan sinyal 'kendali' ini. Biasanya, sinyal penggerak-dasar akan berasal dari osilator berdaya rendah (dibangun dari gerbang logika, atau pada chip tunggal), atau mungkin dari mikroprosesor. Bergantung pada persyaratan daya rangkaian dasar dari transistor pensakelaran utama, dimungkinkan untuk memasukkannya langsung dari osilator; jika perlu, transistor tambahan diselengi antara perangkat utama dan sumber sinyal untuk menyediakan penguat daya yang dibutuhkan.

Sama seperti kita harus memilih sakelar mekanis sehubungan dengan tugasnya, kita harus berhati-hati menggunakan transistor daya yang tepat untuk pekerjaan yang ada di tangan. Secara khusus, kita perlu memastikan bahwa ketika transistor 'menyala', kita tidak melebihi arus aman, atau wilayah semikonduktor aktif perangkat akan hancur oleh panas berlebih. Dan kita harus memastikan bahwa transistor mampu menahan tegangan apa pun yang muncul di persimpangan kolektor-emitor ketika sedang 'mati'. Jika tegangan aman terlampaui, maka transistor akan rusak, dan secara permanen akan 'menyala'.

Heatsink yang cocok akan menjadi kebutuhan. Kita telah melihat bahwa beberapa panas dihasilkan ketika transistor aktif, dan pada tingkat switching yang rendah ini adalah sumber utama panas yang tidak diinginkan. Tetapi pada tingkat switching yang tinggi, 'switching loss' juga bisa sangat penting.

Switching loss adalah panas yang dihasilkan dalam waktu terbatas yang diperlukan untuk transistor untuk beralih dari ke kondisi ‘off’ atau sebaliknya. Rangkaian base-drive akan diatur sedemikian rupa sehingga pergantian berlangsung secepat mungkin, tetapi dalam praktiknya jarang membutuhkan waktu kurang dari beberapa mikrodetik. Selama periode sakelar ‘on’, arus akan menumpuk, sedangkan tegangan kolektor-emitor akan turun ke nol. Torsi puncak yang dicapai karenanya bisa besar, sebelum turun ke nilai yang relatif lebih rendah dari nilai on-state. Tentu saja total energi yang dilepaskan sebagai panas setiap kali perangkat berganti sederhana, karena seluruh proses terjadi begitu cepat. Oleh karena itu jika tingkat switching rendah (katakanlah setiap detik) kehilangan daya switching tidak signifikan dibandingkan dengan daya on-state. Tetapi pada tingkat switching yang tinggi, ketika waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan switching menjadi sebanding dengan waktu kehilangan daya switching dapat dengan mudah menjadi dominan. Dalam proses pengendalian, tingkat switching dari ratusan hertz ke puluhan kilohertz yang rendah digunakan: frekuensi yang lebih tinggi akan diinginkan dari sudut pandang kelancaran pasokan, tetapi tidak dapat digunakan karena switching loss yang dihasilkan menjadi tidak dapat diterima.

Chopper dengan proteksi beban induktif-tegangan berlebih

Sejauh ini kita telah melihat kendali chopper dari beban resistif, tetapi dalam konteks kendali, beban biasanya akan berarti putaran mesin yang akan selalu induktif.

Kendali Chopper terhadap beban induktif sama dengan beban resistif, tetapi kita harus berhati-hati untuk mencegah munculnya tegangan sangat berbahaya setiap kali beban induktif dimatikan. Akar masalahnya terletak pada energi yang tersimpan dalam medan magnetik induktor. Ketika sebuah induktansi L membawa arus I , energi yang disimpan dalam medan magnet (W) diberikan oleh

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.1)$$

Jika induktor dicatu melalui sakelar mekanis, dan kita membuka sakelar dengan maksud mengurangi arus menjadi nol secara instan, maka kita sedang berupaya menghancurkan energi yang tersimpan. Ini tidak mungkin, dan yang terjadi adalah energi dihamburkan dalam bentuk percikan melintasi kontak saklar. Pemicu ini akan akrab bagi siapa saja yang pernah menarik timah bertegangan rendah ke koil pengapian di mobil.

Munculnya percikan menunjukkan bahwa ada tegangan yang sangat tinggi yang cukup untuk memecah udara di sekitarnya. Kita dapat mengantisipasi ini dengan mengingat bahwa tegangan dan arus dalam induktansi berhubungan dengan persamaan

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Tegangan yang diinduksi sendiri sebanding dengan laju perubahan arus, jadi ketika kita membuka sakelar untuk memaksa arus turun ke nol dengan cepat, tegangan yang sangat besar akan tercipta

dalam induktansi. Tegangan ini muncul di terminal sakelar dan jika cukup untuk memecah udara, busur yang dihasilkan memungkinkan arus terus mengalir hingga energi magnetik yang tersimpan dihamburkan sebagai panas dalam busur.

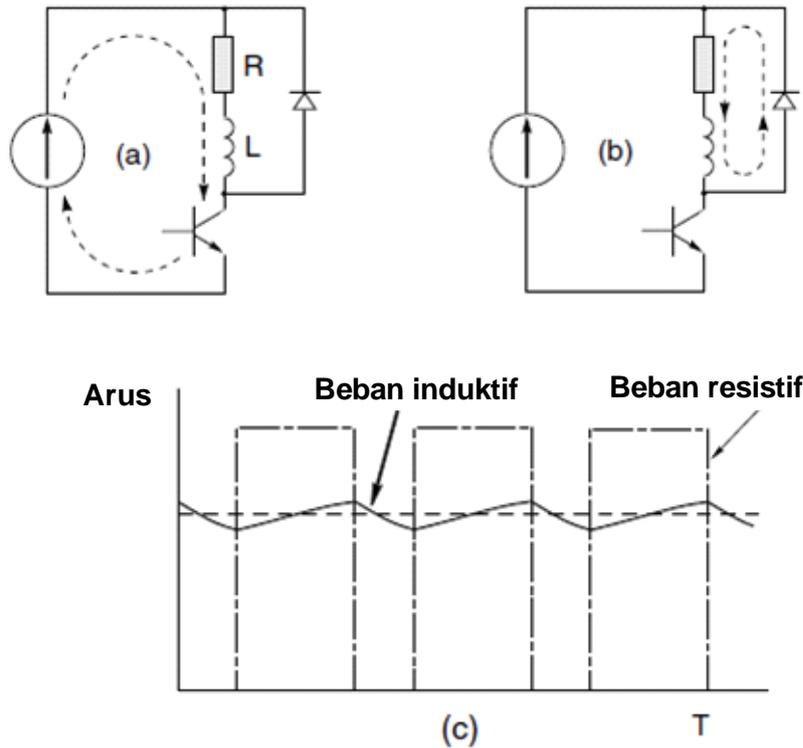
Memicu saklar mekanik tidak mungkin menyebabkan kerusakan langsung, tetapi ketika sebuah transistor digunakan, kematian mendadak sudah pasti terjadi, kecuali langkah-langkah tertentu diambil untuk menjinakkan energi yang tersimpan. Obat yang biasa digunakan pada kasus ini adalah penggunaan 'dioda freewheel' (kadang-kadang disebut dioda flywheel), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Dioda adalah katup satu arah yang menyangkut arus: ia menawarkan sedikit resistensi terhadap arus yang mengalir dari anoda ke katoda (yaitu searah panah lebar pada simbol untuk dioda), tetapi menghalangi aliran arus dari katoda ke anoda. Sebenarnya, ketika dioda daya dikonduktansi ke arah maju, drop tegangan biasanya tidak selalu tergantung pada arus yang mengalir melaluinya, sehingga referensi di atas ke dioda 'menawarkan sedikit perlawanan' tidak sepenuhnya akurat karena tidak mematuhi hukum Ohm. Dalam praktiknya drop tegangan dioda daya (sebagian besar terbuat dari silikon) adalah sekitar 0,7 V, terlepas dari peringkat saat ini.

Dalam rangkaian pada Gambar 2.4 (a), ketika transistor aktif, arus (I) mengalir melalui beban, tetapi tidak melalui dioda, yang dikatakan bias terbalik (yaitu tegangan yang diberikan gagal mencoba mendorong arus turun melalui dioda).

Ketika transistor dimatikan, arus melewatinya dan tagangan baterai turun sangat cepat ke nol. Tetapi berdasarkan energi yang tersimpan dalam induktansi, ini berarti arusnya tidak dapat tiba-tiba menghilang. Jadi, karena tidak ada lagi jalur melalui transistor, arus beralih ke satu-satunya rute lain yang tersedia, dan mengalir ke atas melalui jalur resistansi rendah yang ditawarkan oleh dioda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 (b).

Jelas arus tidak lagi memiliki **baterai** untuk mengendalikannya, sehingga tidak dapat terus mengalir tanpa batas. Faktanya ia hanya akan terus melakukan '*freewheel*' sampai energi yang awalnya disimpan dalam induktansi dihamburkan sebagai panas, terutama dalam tahanan beban tetapi juga dalam resistansi (rendah) dioda itu sendiri. Bentuk gelombang arus selama memotong kemudian akan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 (c). Perhatikan bahwa arus naik dan turun secara eksponensial dengan konstanta waktu L/R , meskipun ia tidak pernah mencapai nilai keadaan tunak-nya pada Gambar 2.4. Sketsa sesuai dengan kasus yang terjadi dimana konstanta waktu jauh lebih lama dari satu periode switching, dalam hal ini arus menjadi hampir mulus, dengan hanya riak kecil. Dalam sebuah penggerak motor DC, inilah yang kami inginkan, karena setiap fluktuasi arus menimbulkan getaran torsi dan getaran mekanis. (Bentuk gelombang arus yang akan diperoleh tanpa induktansi juga ditunjukkan pada Gambar 2.4: arus rata-rata adalah sama tetapi bentuk gelombang arus persegi empat jauh lebih tidak diinginkan, mengingat idealnya kita menginginkan konstanta DC).



Gambar 2.4 Operasi regulator tegangan tipe chopper

Akhirnya, kita perlu memeriksa bahwa dioda freewheel mencegah timbulnya tegangan tinggi yang berbahaya di seluruh transistor. Seperti yang dijelaskan di atas, ketika dioda melakukan drop tegangan forward-bias kecil: biasanya 0,7 V. Oleh karena itu saat arus freewheeling, tegangan pada kolektor transistor hanya 0,7 V di atas tegangan baterai. Karena itu, tindakan 'menjepit' ini membatasi tegangan melintasi transistor ke nilai yang aman dan memungkinkan beban induktif untuk dialihkan tanpa merusak elemen switching.

Fitur dari konverter elektronika daya

Kita dapat menarik beberapa kesimpulan penting yang valid untuk semua konverter elektronika daya dari contoh sederhana ini. Pertama, kendali tegangan yang efisien (dan karenanya daya) hanya layak jika strategi switching diadopsi. Beban dihubungkan secara bergantian dan terputus dari catu melalui sakelar elektronik, dan setiap tegangan rata-rata hingga catu tegangan dapat diperoleh dengan memvariasikan tanda/ruang perbandingan. Kedua, tegangan keluaran DC tidak mulus, tetapi mengandung komponen AC yang tidak diinginkan, yang meskipun tidak diinginkan namun dapat ditoleransi dalam pengendalian motor. Dan akhirnya, bentuk gelombang arus beban akan lebih halus daripada bentuk gelombang tegangan jika seperti halnya belitan motor yang bebannya induktif.

2.3 DC DARI AC-RESTIFIKASI YANG TERKENDALI

Sebagian besar dari semua jenis pengendalian mengambil daya dari tegangan konstan yaitu 50 atau 60 Hz dan di hampir semua induk konverter, tahap pertama terdiri dari penyearah yang mengubah arus AC menjadi bentuk kasar DC. Dimana tegangan konstan (mis. Rata-rata tidak sama) keluaran keluaran DC yang diperlukan, penyearah dioda sederhana (tidak terkendali) sudah cukup. Tetapi ketika tegangan DC rata-rata harus dapat dikendalikan (seperti pada pengendalian motor DC untuk mendapatkan kecepatan yang bervariasi), penyearah terkendali perlu digunakan.

Banyak konfigurasi konverter yang berbeda berdasarkan kombinasi dioda dan tiristor dimungkinkan, tetapi kita akan fokus pada konverter 'yang dikendalikan penuh' dimana semua perangkat yang memperbaiki adalah tiristor. Ini banyak digunakan dalam pengendalian motor modern.

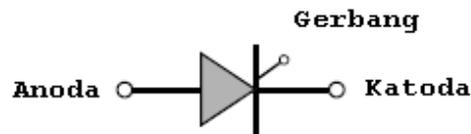
Dari sudut pandang pengguna, mari kita pusatkan perhatian pada pertanyaan-pertanyaan berikut:

- Bagaimana tegangan keluaran dikendalikan?
- Seperti apa tegangan keluaran konverter? Akankah ada? Apakah menjadi masalah jika tegangan tidak DC murni?
- Bagaimana kisaran tegangan keluaran terkait dengan tegangan listrik AC?

Kita dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan ini tanpa masuk terlalu dalam ke detail kerja konverter. Ini juga baik, karena memahami semua seluk beluk operasi konverter berada di luar jangkauan kami. Di sisi lain, ada baiknya mencoba memahami esensi dari proses perbaikan terkendali, karena membantu memahami keterbatasan yang dilakukan konverter pada kinerja drive (lihat Bab 4). Namun, sebelum menangani pertanyaan-pertanyaan yang diajukan di atas, jelas perlu untuk memperkenalkan tiristor terlebih dahulu.

Tiristor

Tiristor adalah saklar elektronik dengan dua terminal utama (anoda dan katoda) dan terminal 'saklar-on' (gerbang), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Seperti dioda, arus hanya dapat mengalir ke arah maju, dari anoda ke katoda. Tetapi tidak seperti dioda, yang akan mengalirkan arus dalam arah maju segera setelah tegangan maju diterapkan, tiristor akan terus memblokir arus maju sampai pulsa arus kecil disuntikkan ke rangkaian gerbang-katoda, untuk menyalakannya atau membakarnya. Setelah pulsa gerbang diterapkan, arus anoda-katoda utama menumpuk dengan cepat, dan segera setelah mencapai tingkat 'latching', pulsa gerbang dapat dilepas dan perangkat akan tetap 'menyala'.



Gambar 2.5 Diagram rangkaian tiristor

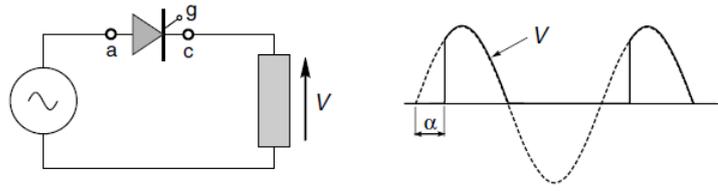
Setelah ditetapkan, arus anoda-katoda tidak dapat diganggu oleh sinyal gerbang apa pun. Keadaan non-konduktor hanya dapat dipulihkan setelah arus anoda-katoda berkurang menjadi nol, dan tetap pada nol pada waktu mematikan (biasanya 100-200 ms dalam kelas konverter tiristor).

Ketika tiristor sedang terkonduksi itu kira-kira ke saklar dalam keadaan tertutup, dengan tegangan drop maju hanya 1 atau 2 V pada berbagai rentang arus. Meskipun drop tegangan rendah dalam keadaan 'on', panas hilang dan heatsink biasanya harus disediakan, mungkin dengan kipas pendingin. Perangkat harus dipilih sehubungan dengan tegangan yang akan diblokir dan arus puncak yang akan dibawa. Kemampuan arus berlebih mereka sangat terbatas, dan biasanya dikendalikan untuk perangkat yang harus menahan arus beban penuh mungkin dua kali selama beberapa detik saja. Sekering khusus harus dipasang untuk melindungi dari arus gangguan yang berat.

Pembaca mungkin bertanya-tanya mengapa kita membutuhkan tiristor, karena pada bagian sebelumnya kita membahas bagaimana sebuah transistor dapat digunakan sebagai saklar elektronik. Pada penjelasan itu transistor tampak lebih baik daripada tiristor karena dapat dimatikan saat arus mengalir, sedangkan tiristor akan tetap hidup sampai arus yang melewatinya telah dikurangi menjadi nol dengan cara eksternal. Alasan utama untuk penggunaan tiristor adalah karena secara harga ia lebih murah dan level tegangan serta arusnya yang lebih tinggi daripada transistor daya. Selain itu, konfigurasi rangkaian dalam penyearah sedemikian rupa sehingga tidak perlu bagi tiristor untuk mengganggu aliran arus, sehingga ketidakmampuan untuk melakukan hal itu tidak merugikan. Tentu saja ada rangkaian lain (lihat misalnya bagian selanjutnya berurusan dengan inverter) dimana perangkat harus dapat mematikan sesuai permintaan, dalam hal ini transistor memiliki keunggulan atas tiristor.

Penyearah pulsa tunggal (*Single-pulse rectifier*)

Rangkaian rectifier fasa terkendali sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.6. Ketika tegangan catu positif, tiristor akan memblokir arus maju sampai pulsa gerbang tiba dan sampai titik ini tegangan melintasi beban resistif adalah nol. Segera setelah pulsa penembak dikirimkan ke rangkaian gerbang katoda (tidak ditunjukkan pada Gambar 2.6) perangkat akan menyala, tegangan yang melewatinya mendekati nol dan tegangan beban menjadi sama dengan tegangan catu. Ketika tegangan catu mencapai nol, begitu juga arus. Pada titik ini tiristor mendapatkan kembali kemampuan memblokirnya, dan tidak ada arus yang mengalir selama setengah siklus negatif.



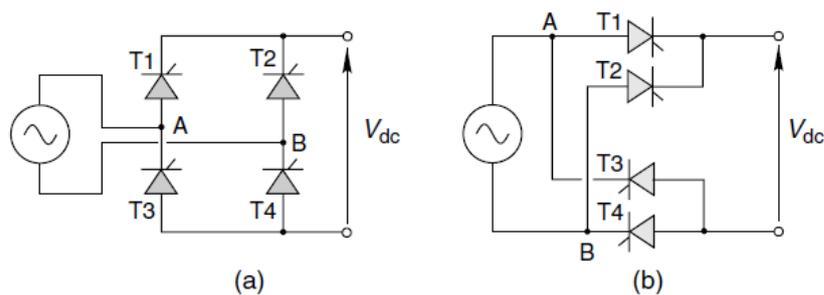
Gambar 2.6 Penyearah tiristor terkendali pulsa tunggal sederhana, dengan beban resistif dan penundaan sudut penyalaan (α)

Jika kita mengabaikan drop-drop tegangan kecil pada-state di tiristor, tegangan beban (Gambar 2.6) akan terdiri dari bagian dari setengah siklus positif dari tegangan catu AC. Jelas tidak mulus, tetapi 'DC' dalam arti memiliki nilai rata-rata positif; dan dengan memvariasikan sudut tunda (α) dari pulsa yang menyala, tegangan rata-rata dapat dikendalikan.

Susunan yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 hanya memberikan satu puncak pada keluaran yang diperbaiki untuk setiap siklus lengkap induk, dan oleh karenanya dikenal sebagai rangkaian 'satu-pulsa' atau setengah-gelombang. Tegangan keluaran (yang idealnya kita ingin menjadi DC stabil) sangat buruk sehingga rangkaian ini tidak pernah digunakan dalam drive. Sebagai gantinya, konverter drive menggunakan empat atau enam tiristor, dan menghasilkan bentuk gelombang keluaran yang jauh lebih unggul dengan dua atau enam pulsa per siklus, seperti yang akan dilihat pada bagian berikut.

Konverter fasa tunggal terkendali penuh-kendali tegangan keluaran

Elemen utama dari rangkaian konverter ditunjukkan pada Gambar 2.7. Ini terdiri dari empat tiristor, terhubung dalam pembentukan jembatan. (Istilah 'jembatan' berasal dari rangkaian pengukur empat lengan awal yang mungkin menyarankan struktur mirip jembatan ke penemunya).



Gambar 2.7. Penyearah sepenuhnya-fasa 2-pulsa (gelombang penuh) yang sepenuhnya dikendalikan

Cara konvensional menggambar rangkaian ditunjukkan pada Gambar 2.7(a), sedangkan pada Gambar 2.7(b) telah digambar ulang untuk membantu pemahaman. Bagian atas beban dapat dihubungkan (melalui T1) ke terminal A dari listrik, atau (melalui T2) ke terminal B dari listrik, dan juga bagian bawah beban dapat dihubungkan baik ke A atau ke B melalui T3 atau T4, masing-masing.

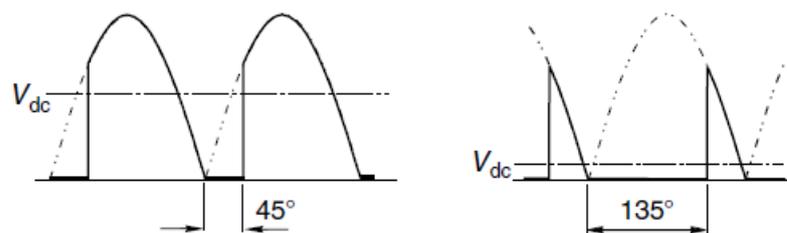
Secara alami kami tertarik untuk mencari tahu apa bentuk gelombang tegangan keluaran akan terlihat seperti pada sisi DC, dan pada khususnya untuk menemukan bagaimana maksud dari level tagangan DC yang dapat dikendalikan dengan memvariasikan sudut tunda pembakaran (α). Ini tidak sesederhana yang kita duga, karena ternyata tegangan rata-rata untuk α tergantung pada sifat beban. Karena itu kita akan melihat pertama pada kasus dimana beban resistif, dan mengeksplorasi mekanisme dasar kendali fasa. Kemudian, kita akan melihat bagaimana konverter berperilaku dengan beban motor yang khas.

Beban resistif

Tiristor T1 dan T4 dinyalakan secara bersamaan ketika terminal A dari catu adalah positif, sedangkan pada setengah siklus lainnya, ketika B positif, tiristor T2 dan T3 dinyalakan secara bersamaan. Bentuk gelombang tegangan keluaran ditunjukkan oleh garis solid pada Gambar 2.8. Ada dua pulsa per siklus listrik, maka deskripsi 'dua-pulsa' atau gelombang penuh. Setiap saat beban terhubung ke hantaran listrik oleh sepasang sakelar T1 dan T4, atau terhubung dengan cara yang lain oleh sepasang sakelar T2 dan T3, atau diputus. Tegangan beban karena itu terdiri dari potongan tegangan listrik yang diperbaiki. Ini jauh lebih lancar daripada di rangkaian pulsa tunggal, meskipun sekali lagi itu jauh dari tagangan DC murni.

Bentuk gelombang pada Gambar 2.8 masing-masing sesuai dengan $\alpha = 45^\circ$ dan $\alpha = 135^\circ$. Nilai rata-rata, V_{dc} ditampilkan dalam setiap kasus. Jelas bahwa semakin besar sudut tunda, semakin rendah tegangan keluaran. Tegangan keluaran maksimum (V_{do}) diperoleh dengan $\alpha = 0^\circ$: ini sama dengan yang akan diperoleh jika tiristor digantikan oleh dioda, dan diberikan oleh

$$V_{do} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \quad (2.3)$$



Gambar 2.8 Bentuk gelombang tegangan keluaran dari penyearah sepenuhnya-fasa terkendali-tunggal dengan beban resistif, untuk penundaan sudut penyalaan 45° dan 135°

di mana V_{rms} adalah r.m.s. tegangan listrik yang masuk. Variasi dari tegangan DC rata-rata dengan α diberikan oleh

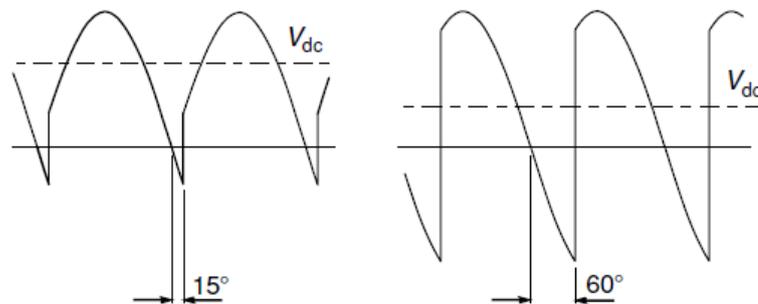
$$V_{dc} = \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) V_{do} \quad (2.4)$$

dari mana kita melihat bahwa dengan beban resistif tegangan DC dapat bervariasi dari maksimum V_{do} hingga nol dengan memvariasikan dari 0° hingga 180° .

Beban induktif (motor)

Seperti disebutkan di atas, beban motor bersifat induktif, dan kita telah melihat sebelumnya bahwa arus tidak dapat berubah secara instan dalam beban induktif. Karena itu kita mengharapkan perilaku konverter dengan beban induktif berbeda dari yang ada pada beban resistif, dimana arus dapat berubah secara instan.

Kesadaran bahwa tegangan rata-rata untuk sudut penyalan tertentu mungkin tergantung pada sifat beban adalah prospek yang paling tidak disukai. Apa yang ingin kami katakan adalah, bahwa terlepas dari bebannya, kami dapat menentukan bentuk gelombang tegangan keluaran setelah kami memperbaiki sudut tunda (a). Kita kemudian akan tahu berapa nilai a untuk memilih untuk mencapai tegangan keluaran rata-rata yang diinginkan. Apa yang kami temukan dalam praktik adalah bahwa setelah kami memperbaiki nilai a , tegangan keluaran rata-rata dengan beban resistif-induktif tidak sama dengan beban resistif murni, dan oleh karena itu kami tidak dapat memberikan formula umum sederhana untuk tegangan keluaran rata-rata dalam hal dari a . Ini tentu saja sangat tidak diinginkan: jika misalnya kita telah mengatur kecepatan motor DC yang dibongkar ke nilai target dengan menyesuaikan sudut penyalan konverter untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang benar, hal terakhir yang kita inginkan adalah tegangan untuk jatuh ketika arus beban yang ditarik oleh motor meningkat, karena ini akan menyebabkan kecepatan turun menjadi di bawah target.



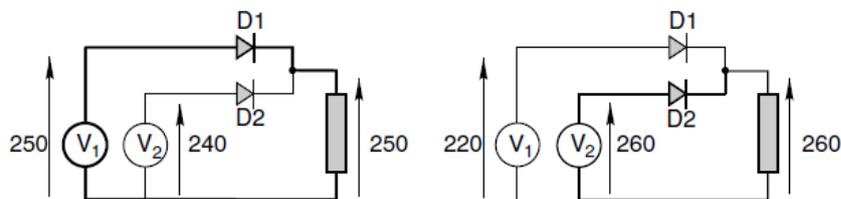
Gambar 2.9 Bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah penuh-fasa tunggal terkendali yang mencatu beban induktif (motor), untuk penundaan sudut penyalan 15° dan 60°

Namun untungnya, ternyata bentuk gelombang tegangan keluaran untuk a tidak menjadi independen dari induktansi beban setelah ada induktansi yang cukup untuk mencegah arus beban dari jatuh ke nol. Kondisi ini dikenal sebagai 'arus kontinu'; dan banyak rangkaian motor memiliki induktansi diri yang cukup untuk memastikan bahwa ia mencapai arus kontinu. Dalam kondisi arus kontinu, bentuk gelombang tegangan keluaran hanya tergantung pada sudut penyalan, dan bukan pada induktansi aktual yang ada. Hal ini membuat banyak hal menjadi lebih mudah, bentuk gelombang tegangan keluaran yang khas untuk kondisi arus kontinu ini ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Bentuk gelombang pada Gambar 2.9 (a) sesuai dengan nilai $\alpha = 15^\circ$, sedangkan Gambar 2.9 (b) sesuai dengan nilai $\alpha = 60^\circ$. Kita melihat bahwa, seperti halnya dengan beban resistif, semakin besar sudut tunda semakin rendah tegangan keluaran rata-rata. Namun, dengan beban resistif tegangan keluaran tidak pernah negatif, sedangkan kita melihat bahwa untuk jangka pendek tegangan keluaran sekarang bisa menjadi negatif. Hal ini terjadi karena induktansi memuluskan arus (lihat Gambar 4.2, misalnya) sehingga tidak pernah jatuh ke nol. Akibatnya, sepasang tiristor selalu terkonduktansi, sehingga setiap saat beban terhubung langsung ke catu utama, dan tegangan beban selalu terdiri dari potongan-potongan dari tegangan catu .

Tidak jelas mengapa arus beralih (atau 'komutasi') dari pasangan tiristor pertama ke pasangan kedua ketika dinyalakan, sehingga pandangan singkat tentang perilaku dioda dalam konfigurasi rangkaian yang sama mungkin bermanfaat untuk titik ini. Pertimbangkan pengaturan yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, dengan dua sumber tegangan (setiap jangka waktu) mencatu beban melalui dua dioda. Pertanyaannya adalah apa yang menentukan dioda mana yang terkonduktansi, dan bagaimana hal ini mempengaruhi tegangan beban?

Kita dapat mempertimbangkan dua contoh seperti yang ditunjukkan pada diagram. Di sebelah kiri, $V_1 = 250$ V, $V_2 = 240$ V, dan D1 terkonduksi, seperti yang ditunjukkan oleh garis berat. Jika kita mengabaikan drop tegangan yang melintasi dioda, tegangan beban akan menjadi 250 V, dan tegangan melintasi dioda D2 akan menjadi $240 - 250 = -10$ V, yaitu bias terbalik dan karenanya dalam keadaan nonkonduktor. Pada saat lain (di sebelah kanan diagram), V_1 telah turun ke 220 V sementara V_2 telah meningkat menjadi 260 V: sekarang D2 melakukan alih-alih D1, sekali lagi ditunjukkan oleh garis berat, dan D1 dibiarkan balik oleh -40 V. Pola sederhananya adalah bahwa dioda dengan potensi anoda tertinggi akan terkonduksi, dan segera setelah itu secara otomatis membalikkan bias pendahulunya. Dalam jembatan dioda fasa tunggal misalnya, pergantian terjadi pada titik dimana tegangan catu melewati nol: pada saat ini tegangan anoda pada satu pasangan berubah dari positif ke negatif, sedangkan pada pasangan lainnya tegangan anoda beralih dari negatif ke positif.



Gambar 2.10 Diagram yang menggambarkan pergantian antar dioda: arus mengalir melalui dioda yang anodanya berada pada potensial lebih tinggi

Situasi dalam jembatan tiristor yang dikendalikan sangat mirip, kecuali bahwa sebelum perangkat baru dapat mengambil alih konduksi, itu tidak hanya harus memiliki potensi anoda yang lebih tinggi, tetapi juga harus menerima pulsa yang dinyalakan. Hal ini memungkinkan pergantian ditunda melebihi komutasi titik (dioda) alami oleh sudut α , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Perhatikan bahwa tegangan rata-rata maksimum (V_{do}) kembali diperoleh ketika α adalah nol, dan sama dengan untuk beban resistif (persamaan 2.3). Sangat mudah untuk menunjukkan bahwa tegangan DC rata-rata sekarang terkait dengan oleh

$$V_{dc} = V_{do} \cos \alpha \quad (2.5)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kita dapat mengontrol tegangan keluaran rata-rata dengan mengendalikan nilai α , meskipun persamaan 2.5 menunjukkan bahwa variasi tegangan rata-rata dengan α berbeda dari yang untuk beban resistif (persamaan 2.4). Kita juga melihat bahwa ketika α lebih besar dari 90° tegangan keluaran rata-rata negatif. Fakta bahwa kita dapat memperoleh tegangan keluaran neto negatif dengan beban induktif sangat kontras dengan kasus beban resistif, dimana tegangan keluaran tidak akan pernah menjadi negatif. Kita akan melihat nanti bahwa fasilitas ini memungkinkan konverter mengembalikan energi dari beban ke catu daya, dan ini penting ketika kita ingin menggunakan konverter dengan motor DC dalam mode regenerasi.

Kadang-kadang disarankan (terutama oleh mereka yang memiliki latar belakang arus cahaya) bahwa kapasitor dapat digunakan untuk memperlancar tegangan keluaran, ini menjadi praktik umum dalam catu daya DC rendah yang murah. Meskipun ini bekerja dengan baik pada daya rendah, ada dua alasan mengapa kapasitor tidak digunakan dengan penyearah terkendali yang mencatu motor. Pertama, seperti yang akan dilihat nanti, tegangan tidak perlu lancar karena arus yang menentukan torsi secara langsung, dan seperti yang telah ditunjukkan, arus selalu jauh lebih lancar daripada tegangan karena induktansi. Dan kedua, tingkat daya di sebagian besar drive sedemikian rupa sehingga untuk menyimpan energi yang cukup untuk memuluskan tegangan yang diperbaiki, kapasitor yang sangat besar dan mahal akan diperlukan.

Konverter 3 fasa terkendali penuh

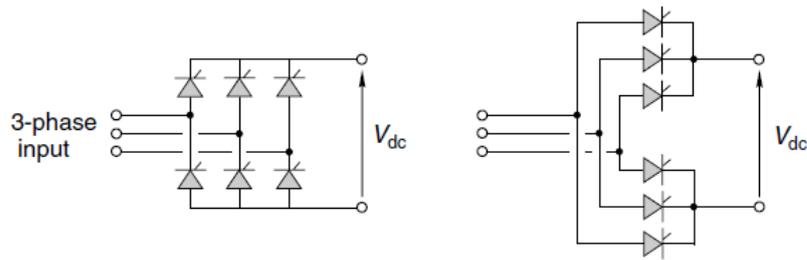
Elemen daya utama ditunjukkan pada Gambar 2.11. Jembatan tiga fasa hanya memiliki dua tiristor lebih dari jembatan fasa tunggal, tetapi bentuk gelombang tegangan keluaran jauh lebih baik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Sekarang ada enam pulsa dari tegangan keluaran per siklus listrik, oleh karena itu dideskripsikan 'enam-pulsa'. Tiristor sekali lagi dinyalakan berpasangan (satu di bagian atas jembatan dan satu dari kaki yang berbeda di bagian bawah), dan masing-masing tiristor membawa arus keluaran selama sepertiga dari waktu. Seperti pada konverter fasa tunggal, sudut tunda mengontrol tegangan keluaran, tetapi sekarang $\alpha = 0$ sesuai dengan titik di mana tegangan fasa sama (lihat Gambar 2.12).

Peningkatan luar biasa dalam kelancaran bentuk gelombang tegangan keluaran jelas terlihat ketika kita membandingkan Gambar 2.9 dan Gambar 2.12, dan ini menunjukkan kebijaksanaan memilih konverter 3 fasa bila memungkinkan. Bentuk gelombang tegangan yang jauh lebih baik juga berarti bahwa kondisi 'arus kontinu' yang diinginkan jauh lebih mungkin untuk dipenuhi, dan oleh karena itu bentuk gelombang pada Gambar 2.12 telah digambarkan dengan asumsi bahwa arus beban sebenarnya

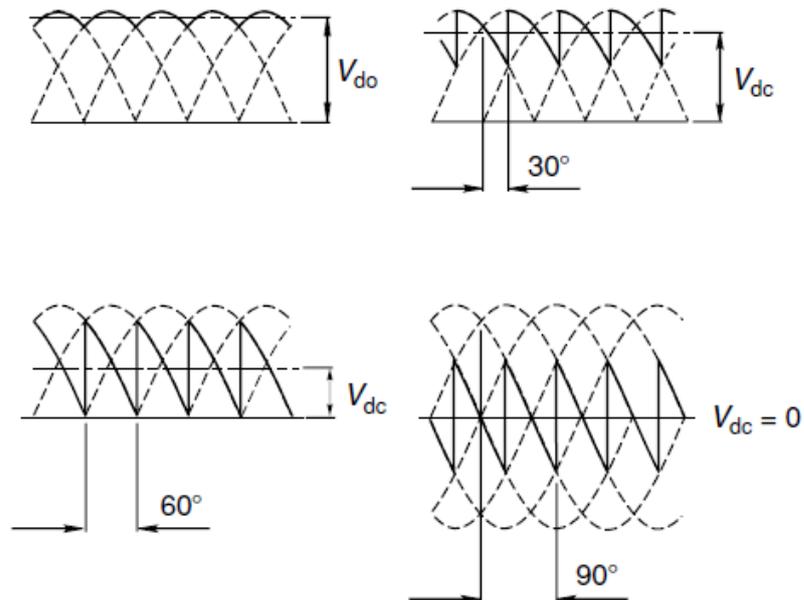
kontinu. Kadang-kadang, bahkan bentuk gelombang enam-pulsa tidak cukup mulus, dan karena itu beberapa konverter kendali yang sangat besar terdiri dari dua konverter enam-pulsa dengan keluaran mereka secara seri. Sebuah transformator pemindah fasa digunakan untuk menyisipkan pemindahan 30° antara catu daya AC ke dua jembatan 3 fasa. Tegangan riak yang dihasilkan kemudian menjadi 12-pulsa.

Kembali ke konverter enam-pulsa, tegangan keluaran rata-rata dapat ditunjukkan oleh

$$V_{dc} = V_{do} \cos a = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \cos a \quad (2.6)$$



Gambar 2.11 Konverter tiristor tiga fasa yang dikendalikan penuh



Gambar 2.12 Bentuk gelombang tegangan keluaran untuk konverter tiristor tiga fasa yang sepenuhnya dikendalikan yang mencatu beban induktif (motor), untuk berbagai sudut penyalan mulai dari 0° hingga 90° . Tegangan DC rata-rata ditunjukkan oleh garis horizontal, kecuali untuk $a = 90^\circ$ di mana tegangan DC rata-rata adalah nol

Kami mencatat bahwa kami dapat memperoleh rentang tegangan keluaran penuh dari $+V_{do}$ ke $-V_{do}$, sehingga, seperti dengan konverter fasa tunggal, operasi regeneratif akan dimungkinkan.

Rentang tegangan keluaran

Kita beralih sekarang ke catu tiga fasa biasa, tegangan industri tiga fasa terendah biasanya sekitar 380-440 V. (Tegangan lebih tinggi hingga 11 kV digunakan untuk kendali besar, tetapi ini tidak akan dibahas di sini). Jadi dengan $V_{\text{rms}} = 415\text{V}$ misalnya, maksimum tegangan DC keluaran jika dilihat persamaan 2.6 adalah 560 V. Setelah kelonggaran dibuat untuk variasi pasokan dan penurunan impedansi, kita tidak bisa mengandalkannya untuk memperoleh lebih dari 520-540 V, dan biasanya untuk motor yang digunakan dengan kendali *six-pulse* yang diumpankan dari 415 V, catu tiga fasa akan diberi peringkat dalam kisaran 440-500 V. (Seringkali belitan motor akan dicatu dari fasa tunggal adalah 240 V, dan peringkat medan tegangan kemudian sekitar 180-200 V, untuk memungkinkan margin dalam tangan dari maksimum 216 V yang secara teoritis telah disebut sebelumnya.)

Rangkaian penyalan

Karena pulsa gerbang hanya berdaya rendah, maka rangkaian kendali gerbang umumnya sederhana dan murah. Seringkali satu rangkaian terintegrasi (chip) berisi semua rangkaian untuk menghasilkan pulsa gerbang, dan untuk menyinkronkannya dengan sudut penundaan yang sesuai (α) sehubungan dengan tegangan catu. Untuk menghindari sambungan listrik langsung (*short-circuit*) antara tegangan tinggi di rangkaian daya utama dan tegangan rendah yang digunakan di rangkaian kendali, pulsa gerbang biasanya digabungkan ke tiristor melalui transformator pulsa kecil. Sebagian besar konverter juga menyertakan apa yang dikenal sebagai rangkaian penyalan 'inverse cosine-weighted': ini berarti bahwa rangkaian penembakan diatur sedemikian rupa sehingga hubungan 'cosinus' digabungkan secara internal sehingga tegangan keluaran rata-rata konverter menjadi berbanding lurus dengan masukan tegangan kendali, yang biasanya berkisar antarangkaian 0 hingga 10 V.

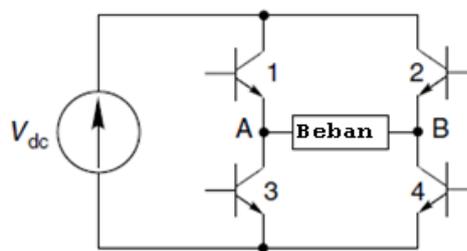
2.4 AC DARI DC: INVERSI SP-SP

Cara mendapatkan AC dari DC dikenal sebagai inversi, dan sembilan dari sepuluh kita idealnya ingin dapat menghasilkan tegangan keluaran sinusoidal dari frekuensi dan amplitudo apa pun yang kita pilih. Sayangnya kendala yang dipaksakan oleh kebutuhan untuk menggunakan strategi switching berarti bahwa kita selalu harus puas dengan bentuk gelombang tegangan yang terdiri dari bongkahan persegi panjang, dan dengan demikian jauh dari ideal. Namun demikian ternyata motor AC sangat toleran, dan akan beroperasi dengan memuaskan walaupun bentuk gelombang rendah dihasilkan oleh inverter.

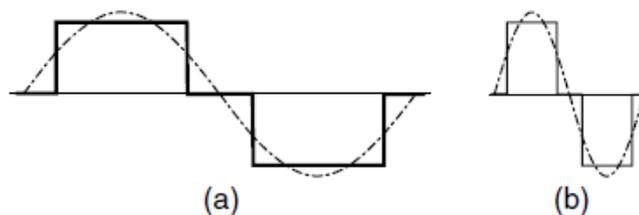
Inverter satu fasa

Kita dapat menggambarkan dasar operasi inverter dengan mempertimbangkan contoh fasa tunggal yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Inverter ini menggunakan transistor bipolar sebagai elemen switching, dengan dioda (tidak ditampilkan) untuk memberikan jalur freewheel yang diperlukan ketika beban bersifat induktif.

Sisi masukan atau DC dari inverter (di sebelah kiri pada Gambar 2.13) biasanya disebut sebagai 'DC link', yang mencerminkan fakta bahwa dalam sebagian besar kasus, DC diperoleh dengan menyearahkan frekuensi konstan yang masuk. Sisi keluaran atau AC diambil dari terminal A dan B seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 rangkaian inverter untuk keluaran fasa tunggal. (Empat dioda freewheel telah dihilangkan demi kejelasan.)



Gambar 2.14 Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter dengan beban resistif

Ketika transistor 1 dan 4 dinyalakan, tegangan beban positif, kemudian sama dengan tegangan DC link, sedangkan ketika 2 dan 3 dinyalakan maka ia negatif. Jika tidak ada perangkat yang diaktifkan, tegangan keluaran adalah nol. Bentuk gelombang tegangan keluaran tipikal pada frekuensi switching rendah dan tinggi masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2.14 (a) dan (b).

Di sini, setiap pasang perangkat aktif selama sepertiga siklus, dan semua perangkat dalam kondisi mati untuk dua periode, seperenam siklus. Bentuk gelombang keluaran jelas bukan gelombang sinus, tetapi setidaknya itu bolak-balik dan simetris. Komponen fundamental ditunjukkan oleh bagian bertitik pada Gambar 2.14.

Dalam setiap siklus pola switching teratur, dan mudah diprogram menggunakan rangkaian logika yang sesuai. Variasi frekuensi diperoleh dengan mengubah frekuensi jam mengendalikan pola switching empat langkah. (Osilator yang menyediakan sinyal clock dapat dikendalikan oleh tegangan

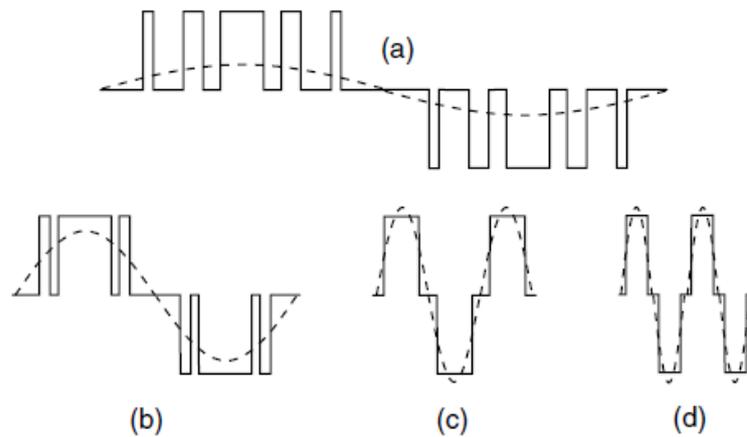
analog, atau dapat dihasilkan menggunakan perangkat lunak.) Efek dari berbagai frekuensi switching ditunjukkan pada Gambar 2.14, dari mana kita dapat melihat bahwa amplitudo komponen fundamental dari tegangan tetap konstan, terlepas dari frekuensi. Sayangnya (seperti dijelaskan pada Bab 7), ini bukan yang kita inginkan untuk mencatu motor induksi: untuk mencegah fluks celah udara pada motor agar tidak turun ketika frekuensi dinaikkan, kita harus dapat meningkatkan tegangan sesuai proporsi. frekuensi. Kami akan melihat kendali tegangan segera, setelah penyimpangan singkat untuk membahas masalah 'penembakan'.

Inverter dengan konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dan 2.16 tunduk pada kondisi yang berpotensi merusak yang dapat timbul jika kedua transistor dalam satu 'kaki' inverter secara tidak sengaja menyala secara bersamaan. Ini seharusnya tidak pernah terjadi jika perangkat diaktifkan dengan benar, tetapi jika terjadi kesalahan dan kedua perangkat bekerja bersama-bahkan untuk waktu yang sangat singkat-mereka membentuk hubungan pendek di seluruh tautan DC. Kondisi kesalahan ini disebut sebagai 'tembak-menembak' karena arus yang tinggi terbentuk dengan sangat cepat, menghancurkan perangkat. Inverter yang baik karenanya mencakup ketentuan untuk melindungi terhadap kemungkinan penembakan, biasanya dengan memaksakan waktu tunda minimum antara satu perangkat di kaki mati dan yang lainnya datang.

Inverter dengan konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dan 2.16 memiliki kondisi yang berpotensi merusak yang akan timbul jika kedua transistor dalam satu 'kaki' inverter secara tidak sengaja menyala secara bersamaan. Ini seharusnya tidak pernah terjadi jika perangkat diaktifkan dengan benar, tetapi jika terjadi kesalahan dan kedua perangkat bekerja bersama-bahkan untuk waktu yang sangat singkat-mereka membentuk hubungan pendek di seluruh DC link. Kondisi kesalahan ini disebut sebagai 'tembak-menembak' karena arus yang tinggi terbentuk dengan sangat cepat dan menghancurkan perangkat. Inverter yang baik mencakup ketentuan untuk melindungi terhadap kemungkinan penembakan, biasanya dengan memaksakan waktu tunda minimum antara satu perangkat di kaki yang mati dan yang lainnya menyala.

Kendali tegangan keluaran

Ada dua cara amplitudo tegangan keluaran dapat dikendalikan. Pertama, jika DC link disediakan dari sumber listrik AC melalui penyearah terkendali atau dari baterai melalui perajang, tegangan DC link dapat bervariasi. Kita kemudian dapat mengatur amplitudo tegangan keluaran ke nilai apa pun dalam rentang link. Untuk kendali motor AC kita dapat mengatur tegangan link untuk melacak frekuensi keluaran inverter, sehingga pada frekuensi keluaran tinggi kita memperoleh tegangan keluaran tinggi dan sebaliknya. Metode kendali tegangan ini menghasilkan inverter sederhana, tetapi membutuhkan penyearah terkendali (dan karenanya relatif mahal) untuk DC link.



Gambar 2.15 Tegangan keluaran inverter dan kendali frekuensi dengan modulasi lebar-pulsa

Metode kedua, yang mendominasi dalam ukuran kecil dan menengah, menggunakan kendali tegangan dengan modulasi lebar-pulsa (PWM) di dalam inverter itu sendiri. Penyearah tak terkendali yang lebih murah kemudian dapat digunakan untuk menyediakan tegangan DC link yang konstan.

Prinsip kendali tegangan oleh PWM diilustrasikan pada Gambar 2.15.

Pada frekuensi keluaran rendah, tegangan dengan keluaran rendah biasanya diperlukan, jadi salah satu dari setiap pasangan perangkat digunakan untuk memotong tegangan, rasio mark-space bervariasi untuk mencapai tegangan yang diinginkan pada keluaran. Komponen tegangan fundamental rendah pada frekuensi rendah ditunjukkan pada Gambar 2.15 (a). Pada frekuensi yang lebih tinggi diperlukan tegangan yang lebih tinggi pula, sehingga perangkat pencacah dibiarkan melakukan fraksi yang lebih lama dari setiap siklus, memberikan keluaran fundamental yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 (b). Karena frekuensi dinaikkan lebih tinggi, periode 'on' yang terpisah akhirnya bergabung, memberikan bentuk gelombang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 (c). Peningkatan frekuensi lebih lanjut terjadi tanpa peningkatan tegangan keluaran lebih lanjut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 (d).

Dalam aplikasi penggerak, rentang frekuensi tempat rasio tegangan/frekuensi dapat dijaga konstan dikenal sebagai wilayah 'PWM', dan batas atas kisaran biasanya diambil untuk menentukan kecepatan dasar motor. Di atas frekuensi ini, inverter tidak dapat lagi mencocokkan tegangan dengan frekuensi, inverter secara efektif telah kehabisan uap sejauh menyangkut tegangan. Tegangan maksimum dengan demikian diatur oleh tegangan tautan, yang karenanya harus cukup tinggi untuk menyediakan tegangan fundamental yang dibutuhkan motor pada kecepatan dasarnya, yang biasanya antara 50 atau 60 Hz.

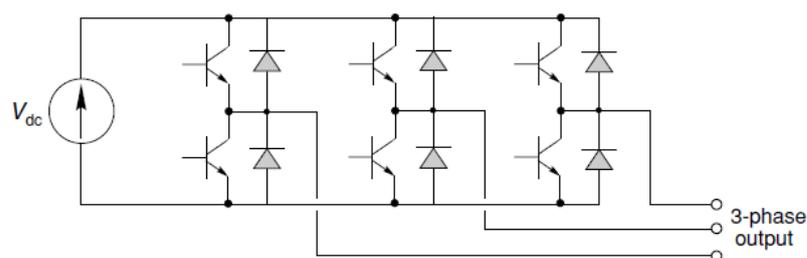
Di luar wilayah PWM bentuk gelombang tegangan adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 (d): bentuk gelombang ini biasanya disebut sebagai 'kuasi-kuadrat', meskipun dalam terang keseluruhan objek percobaan (untuk perkiraan gelombang sinus) deskripsi yang lebih baik mungkin adalah 'quasi-sine'.

Saat mencatu beban motor induktif, dioda freewheel pemulihan cepat diperlukan secara paralel dengan setiap perangkat. Ini mungkin perangkat diskrit, atau dipasang dalam paket bersama dengan transistor, atau bahkan terintegrasi untuk membentuk perangkat transistor/dioda tunggal.

PWM sinusoidal

Sejauh ini kami telah menekankan pentingnya untuk dapat mengontrol amplitudo tegangan keluaran mendasar dengan memodulasi lebar pulsa yang membentuk gelombang keluaran. Jika ini adalah satu-satunya persyaratan, kita akan memiliki rentang pola modulasi yang tak terbatas yang akan cukup. Tetapi juga amplitudo fundamental yang tepat, kami ingin harmonik diminimalkan, yaitu kami ingin bentuk gelombang keluaran sedekat mungkin dengan gelombang sinus murni. Sangat penting untuk membatasi amplitudo harmonik orde rendah, karena ini adalah yang paling mungkin memicu respons yang tidak diinginkan dari motor.

Karenanya, jumlah, lebar, dan jarak pulsa dioptimalkan untuk menjaga konten harmonik serendah mungkin. Sejumlah strategi canggih telah dikembangkan, hampir semuanya menggunakan sistem berbasis mikroprosesor untuk menyimpan dan menghasilkan pola modulasi. Ada keuntungan yang jelas dalam menggunakan frekuensi switching yang tinggi, karena ada lebih banyak pulsa untuk dimainkan. Frekuensi ultrasonik sekarang banyak digunakan, dan perangkat untuk meningkatkan frekuensi switching yang terus meningkat. Sebagian besar pabrikan mengklaim sistem khusus mereka lebih baik daripada pesaing, tetapi tidak jelas mana yang pada akhirnya akan muncul sebagai yang terbaik untuk operasi motor. Beberapa skema awal menggunakan pulsa yang relatif sedikit per siklus, dan mengubah jumlah pulsa dalam langkah-langkah terpisah, yang membuat mereka mendapat julukan "pengubah gigi". Inverter ini berisik dan menjengkelkan.



Gambar 2.16 Rangkaian daya inverter tiga fasa

Inverter 3 fasa

Keluaran 3 fasa dapat diperoleh dengan hanya menambahkan dua sakelar lagi ke empat yang diperlukan untuk inverter fasa tunggal, memberikan konfigurasi rangkaian daya khas yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Seperti biasa, dioda freewheel diperlukan secara paralel dengan masing-masing transistor untuk melindungi terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh beban induktif (motor).

Kami mencatat bahwa konfigurasi rangkaian pada Gambar 2.16 sama dengan untuk penyearah terkendali 3 fasa yang terlihat sebelumnya. Kami sebutkan kemudian bahwa penyearah terkendali dapat digunakan untuk regenerasi, yaitu untuk mengubah daya dari DC ke AC, dan ini tentu saja 'inversi' seperti yang sekarang kita pahami.

Komutasi paksa dan alami-perspektif sejarah

Kami berasumsi bahwa dalam diskusi ini, perangkat switching dapat mematikan atau 'mengkomutasi' sesuai permintaan, sehingga arus keluaran (beban) berkurang menjadi nol atau diarahkan ke bagian lain dari inverter. Transistor dan tiristor komutasi gerbang (lihat Bagian 2.4.6) dapat beroperasi seperti ini, tetapi, seperti dijelaskan sebelumnya, tiristor konvensional tidak dapat mematikan perintah. Namun demikian tiristor banyak digunakan untuk membalikkan daya dari DC ke AC seperti yang akan kita lihat ketika kita melihat kendali motor DC di Bab 4, jadi kita harus melihat secara singkat bagaimana ini mungkin terjadi.

Ada dua cara berbeda di mana tiristor digunakan dalam inverter. Yang pertama, di mana inverter digunakan untuk mencatu AC yang pada dasarnya memiliki beban pasif, seperti motor induksi, masing-masing tiristor harus dilengkapi dengan rangkaian 'pergantian komuter' bantu tambahannya sendiri, yang tugasnya adalah memaksa arus melalui tiristor ke nol ketika saatnya tiba untuk dimatikan. Rangkaian penyaklaran cukup kompleks, dan membutuhkan kapasitor besar untuk menyimpan energi yang dibutuhkan untuk penyaklaran. Oleh karena itu konverter tiristor yang dapat diputus paksa cenderung besar dan mahal. Pada satu waktu mereka adalah satu-satunya alternatif, tetapi mereka sekarang sudah usang, dan telah digantikan oleh versi lain seperti MOSFET, IGBT atau GTO (lihat Bagian 2.5).

Cara lain di mana tiristor dapat digunakan untuk membalikkan daya dari DC ke AC adalah ketika sisi jembatan AC terhubung ke catu daya listrik tiga fasa (mis. Impedansi sumber rendah). Ini adalah pengaturan 'penyearah terkendali' normal yang telah diperkenalkan sebelumnya. Dalam hal ini ternyata bahwa arus dalam tiristor secara alami dipaksa ke nol oleh tegangan listrik aktif, sehingga memungkinkan tiristor untuk mengubah atau mematikannya secara alami. Mode operasi ini terus menjadi penting, seperti yang akan kita lihat ketika kita melihat kendali motor DC.

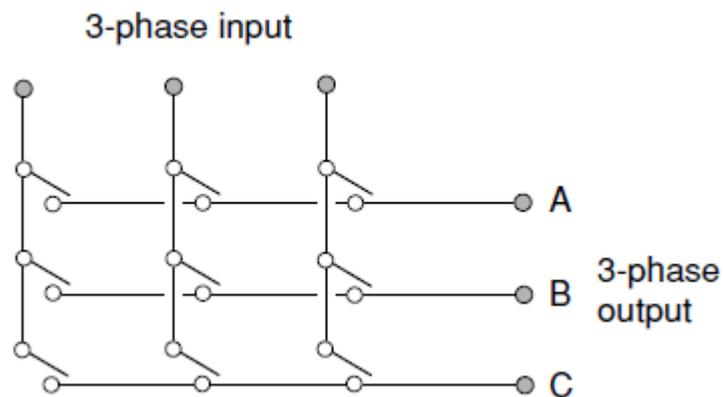
Matrix Converter

Masing-masing konverter yang telah kita lihat sejauh ini telah dikembangkan dengan fungsi tertentu dalam pikiran (misalnya memperbaiki AC untuk mendapatkan DC), tetapi mereka berbagi fitur umum yang penting karena semuanya melibatkan penggunaan perangkat switching yang dioperasikan secara berurutan untuk menghubungkan terminal keluaran ke terminal catu. Di semua rangkaian ini, perangkat switching (transistor, tiristor, dan dioda) hanya dapat mengalirkan arus dalam satu arah, dan ini menghasilkan keterbatasan pada kemampuan rangkaian untuk beroperasi dengan

aliran daya terbalik: untuk beberapa rangkaian, misalnya dioda penyearah sederhana, aliran daya terbalik tidak mungkin sama sekali.

Konverter daya-elektronik yang ideal akan memungkinkan konversi daya di kedua arah antara dua sistem dengan tegangan dan frekuensi apa pun, termasuk DC, dan tidak akan melibatkan tahap perantara apa pun, seperti DC link. Pada prinsipnya hal ini dapat dicapai melalui berbagai sakelar yang memungkinkan, salah satu dari sekumpulan terminal masukan dihubungkan ke salah satu dari sekumpulan terminal keluaran, pada saat yang diinginkan. Tidak mengherankan, nama generik untuk konverter tersebut adalah 'matrix converter'.

Sebagai contoh, Gambar 2.17 menunjukkan sembilan sakelar yang diatur untuk memungkinkan konversi daya antara dua sistem tiga fasa.



Gambar 2.17 Prinsip matrix converter

Operasi ini dapat dipahami dengan membayangkan bahwa tegangan masukan adalah dari sistem induk tiga fasa sinusoidal, sehingga pada setiap saat kita tahu persis apa yang akan terjadi pada setiap tegangan line-to-line yang masuk. Mari kita asumsikan bahwa kita ingin mensintesis keluaran sinusoidal tiga fasa dari tegangan dan frekuensi yang diketahui. Setiap saat kita tahu tegangan apa yang kita inginkan, katakanlah diantara line A dan B, dan kita tahu berapa tegangan di antara tiga fasa yang masuk. Jadi kita beralih pada pasangan mana saja dari sakelar A dan B yang menghubungkan kita dengan dua jalur masuk yang tegangannya saat itu paling dekat dengan tegangan line-to-line keluaran yang diinginkan, dan kita tetap menggunakannya, sementara hal itu menawarkan perkiraan terbaik untuk apa kita inginkan. Ketika kombinasi sakelar yang berbeda memungkinkan kita untuk menghubungkan ke pasangan jalur masukan yang lebih tepat, pola switching akan berubah.

Sedikit pemikiran akan memperjelas bahwa sejak saat itu hanya ada tiga tegangan line-to-line yang masuk untuk dipilih, kita tidak bisa berharap untuk mensintesis bentuk gelombang sinusoidal yang layak dengan jenis switching diskrit ini, meskipun ini adalah pendekatan yang diambil untuk mendapatkan keluaran frekuensi rendah dalam kendali *cycloconverter*. Untuk mendapatkan perkiraan yang lebih baik terhadap bentuk gelombang sinusoidal, kita harus menggunakan pemotong, tempat

kita beralih dengan cepat untuk mematikan modulasi amplitudo tegangan keluaran. Ini berarti bahwa sakelar harus mampu beroperasi pada frekuensi yang jauh lebih tinggi daripada frekuensi keluaran dasar, sehingga rugi-rugi pada sakelar menjadi pertimbangan penting.

Agar konverter tersebut dapat mentransmisikan daya di kedua arah (sehingga istilah masukan dan keluaran berhenti memiliki makna tertentu), sakelar (ditunjukkan pada Gambar 2.17) harus mampu membawa arus di kedua arah. Kurangnya perangkat tunggal yang terjangkau dengan kemampuan arus dua arah ini menjelaskan mengapa matrix converter belum signifikan di pasar kendali, tetapi perkembangannya menarik perhatian dan mereka cenderung muncul ketika strategi kendali yang ditingkatkan dan perangkat switching dua arah menjadi lebih praktis.

2.5 PERANGKAT SWITCHING INVERTER

Sejauh menyangkut pengguna, tidak terlalu penting apa jenis perangkat switching yang digunakan di dalam inverter, tetapi mungkin hal ini membantu untuk menyebutkan empat keluarga perangkat yang paling penting dalam penggunaan perangkat saat ini sehingga terminologi dan simbol-simbol yang sudah dikenal digunakan untuk setiap perangkat dapat dikenali. Fitur yang menyatukan keempat perangkat adalah bahwa mereka dapat dinyalakan dan dimatikan dengan menggunakan sinyal kendali berdaya rendah, yaitu mereka dapat melakukan switching sendiri. Kita telah melihat sebelumnya bahwa kemampuan untuk dihidupkan atau dimatikan ini sesuai permintaan sangat penting dalam setiap inverter yang mengumpankan beban pasif, seperti motor induksi.

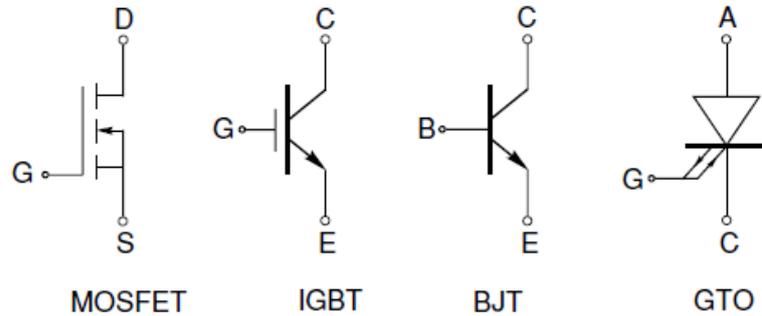
Setiap perangkat akan dibahas secara singkat di bawah ini, dengan indikasi luas tentang rentang aplikasinya yang paling mungkin. Karena ada tumpang tindih yang cukup besar di antara perangkat yang bersaing, tidak mungkin menjadi dogmatis dan menentukan perangkat mana yang terbaik, dan pembaca tidak perlu heran jika satu produsen dapat menawarkan inverter 5 kW yang menggunakan MOSFET sementara yang lain memilih untuk menggunakan IGBT. Seluruh bisnis elektronika daya masih berkembang: ada perangkat lain (seperti yang berbasis silikon karbida) yang belum muncul ke kancah kendali. Satu tren yang berlanjut adalah integrasi kendali dan rangkaian keamanan dalam paket yang sama dengan perangkat switching. Hal ini jelas mengarah pada penyederhanaan dan penghematan dalam pembangunan konverter lengkap.

Bipolar junction transistor (BJT)

Secara historis BJT adalah perangkat yang pertama digunakan untuk penyaklaran daya. Dari dua versi (NPN dan PNP) hanya NPN yang telah banyak digunakan dalam inverter untuk kemudi, terutama dalam aplikasi yang berkisar hingga beberapa kilowatt dan beberapa ratus volt.

Versi npn ditunjukkan pada Gambar 2.18: arus (beban) utama mengalir ke kolektor (C) dan keluar dari emitor (E), seperti yang ditunjukkan oleh panah pada simbol perangkat. Untuk menghidupkan perangkat (misalnya agar resistansi rangkaian kolektor-emitor rendah, sehingga arus beban dapat

mengalir), arus kecil harus dibuat mengalir dari basis (B) ke emitor. Ketika arus basis-emitor adalah nol, resistansi rangkaian kolektor-emitor sangat tinggi dan perangkat dimatikan.



Gambar 2.18 Simbol rangkaian untuk perangkat komutasi-diri

Keuntungan dari BJT adalah ketika dinyalakan, tegangan kolektor-emitor rendah (lihat Gambar 2.3) dan karenanya disipasi daya lebih kecil dibandingkan dengan daya beban, misalnya perangkat ini adalah saklar daya yang efisien. Kerugiannya adalah bahwa meskipun daya yang diperlukan dalam rangkaian basis-emitor kecil dibandingkan dengan daya beban, itu tidak signifikan dan dalam transistor daya terbesar dapat berjumlah beberapa puluh watt. Ini berarti bahwa kompleksitas dan biaya rangkaian penggerak dasar dapat dipertimbangkan.

Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET)

Sejak 1980-an, kekuatan MOSFET telah menggantikan BJT dalam inverter untuk aplikasi kendali. Seperti halnya BJT, MOSFET adalah perangkat tiga terminal dan tersedia dalam dua versi, N-channel dan P-channel. N-channel adalah yang paling banyak digunakan, dan ditunjukkan pada Gambar 2.18. Arus (beban) utama mengalir ke saluran (D) dan keluar dari sumber (S). (Yang membingungkan, arus beban dalam kasus ini mengalir dalam arah yang berlawanan dengan panah pada simbol.) Berbeda dengan BJT, yang dikendalikan oleh arus basis, MOSFET dikendalikan oleh tegangan gerbang catu daya.

Untuk menghidupkan perangkat, tegangan sumber gerbang harus berada di atas ambang beberapa volt. Ketika tegangan pertama kali diterapkan pada gerbang, arus mengalir dalam **sumber parasit gate-drain dan kapasitansi gate-drain**, tetapi begitu kapasitansi ini telah diisi arus masukan ke gerbang dapat diabaikan, sehingga daya penggerak gerbang dalam keadaan tunak minimal. Untuk mematikan perangkat, kapasitansi parasit harus dilepaskan dan tegangan sumber gerbang harus ditahan di bawah tingkat ambang batas.

Keuntungan utama dari MOSFET adalah bahwa ia adalah perangkat kendali tagangan yang memerlukan daya yang dapat diabaikan untuk menahannya dalam keadaan aktif. Rangkaian kendali gerbang dengan demikian lebih kompleks dan lebih murah daripada Rangkaian kendali dasar dari perangkat bipolar yang setara. Kerugian dari MOSFET adalah bahwa dalam keadaan 'on' resistensi

yang efektif dari sumber pembuangan lebih tinggi daripada perangkat bipolar yang setara, sehingga disipasi daya lebih tinggi dan perangkat agak kurang efisien sebagai saklar daya. MOSFET digunakan pada inverter daya rendah dan sedang hingga beberapa kilowatt, dengan tegangan yang umumnya tidak melebihi 700 V.

Insulated gate bipolar transistor (IGBT)

IGBT (Gambar 2.18) adalah perangkat hybrid yang menggabungkan fitur-fitur terbaik dari MOSFET (yaitu kemudahan mengaktifkan dan mematikan gerbang dari rangkaian logika daya rendah) dan BJT (disipasi daya yang relatif rendah di rangkaian kolektor-emitor utama). Keuntungan-keuntungan yang jelas ini menjadikan IGBT keunggulan atas MOSFET dan BJT, dan menjelaskan dominasi mereka di semua aplikasi kemudi kecil. Mereka sangat cocok untuk daya sedang dan kisaran tegangan menengah (hingga beberapa ratus kilowatt).

Jalur untuk arus (beban) utama adalah dari kolektor ke emitor, seperti pada perangkat bipolar NPN.

Gate turn-off thyristor (GTO)

GTO (Gambar 2.18) dihidupkan oleh pulsa arus di rangkaian gerbang katoda dengan cara yang sama seperti tiristor konvensional. Tetapi tidak seperti tiristor biasa, yang tidak dapat dimatikan oleh aksi gerbang, GTO dapat dimatikan oleh arus katoda gerbang negatif. Arus (beban) utama mengalir dari anoda ke katoda, seperti pada tiristor konvensional. Jalur panah kembar di lead gerbang (Gambar 2.18) menunjukkan bahwa aksi kendali yang dicapai oleh arus gerbang maju dan mundur. (Dalam literatur AS, lead gerbang tunggal dengan palang pendek digunakan sebagai ganti dari dua panah.)

Persyaratan kendali gerbang lebih banyak diminati daripada untuk tiristor konvensional, dan kinerja di state lebih buruk, dengan drop tegangan maju sekitar 3 V dibandingkan dengan 1,5 V, tetapi ini adalah kerugian yang harus dibayar sebagai imbalan untuk tambahan fleksibilitas. GTO memiliki tegangan dan peringkat arus yang jauh lebih tinggi (hingga 3 kV dan 2 kA) daripada tiga perangkat lainnya dan karenanya GTO banyak digunakan pada inverter berdaya tinggi.

Bentuk Gelombang Konverter dan Gangguan Akustik

Secara umum dalam sebagian besar buku teks, bentuk gelombang yang ditunjukkan dalam bab ini adalah apa yang kita harapkan untuk dilihat dalam kondisi ideal. Masuk akal untuk berkonsentrasi pada bentuk gelombang ideal ini dengan asumsi pemahaman dasar, tetapi kita harus diingatkan bahwa apa yang kita lihat pada osiloskop mungkin terlihat agak berbeda!

Kita telah melihat bahwa esensi dari elektronika daya adalah proses pemyaklaran, jadi seharusnya tidak terlalu mengejutkan mengetahui bahwa dalam praktiknya proses pemyaklaran jarang dicapai dengan cara yang jelas seperti yang kita asumsikan. Biasanya, akan ada semacam osilasi frekuensi

tinggi atau 'dering', terutama pada bentuk gelombang tegangan yang mengikuti setiap transisi karena peralihan. Hal ini disebabkan oleh efek kapasitansi dan induktansi yang menyimpang; hal itu harus diantisipasi pada tahap desain, dan langkah-langkah tertentu harus diambil untuk menguranginya dengan memasang rangkaian snubbing di tempat-tempat yang sesuai dalam konverter. Namun penjelasan lengkap semua fenomena ini sementara jarang bermanfaat secara ekonomi sehingga pengguna tidak perlu terlalu khawatir untuk melihat sisa-sisa fenomena sementara dalam bentuk gelombang keluaran.

Gangguan akustik juga merupakan masalah yang bisa membuat khawatir pendatang baru. Sebagian besar konverter elektronik memancarkan suara regekan atau bersenandung pada frekuensi yang sesuai dengan fundamental dan harmonik dari frekuensi switching, meskipun ketika konverter digunakan untuk memberi umpan motor, suara dari motor biasanya jauh lebih keras daripada suara dari konverter itu sendiri. Bunyi-bunyian ini sangat sulit untuk dijelaskan dengan kata-kata, tetapi biasanya berkisar dari dengungan bernada tinggi hingga regekan. Mereka bervariasi dalam intensitas dengan ukuran konverter dan beban, dan bagi telinga yang sudah terlatih, hal tersebut dapat memberikan indikasi yang baik tentang kesehatan motor dan konverter.

2.6 PENDINGINAN PERANGKAT SAKLAR DAYA

Resistensi termal

Kita telah melihat bahwa dengan mengadopsi strategi switching, kehilangan daya pada perangkat switching lebih kecil dibandingkan dengan daya keluaran, sehingga konverter memiliki efisiensi tinggi. Namun demikian, hampir semua panas yang diproduksi di perangkat switching dilepaskan di wilayah semikonduktor aktif, yang itu sendiri sangat kecil dan akan terlalu panas dan rusak kecuali jika didinginkan secara memadai. Oleh karena itu penting untuk memastikan bahwa bahkan di bawah kondisi operasi yang paling berat, suhu persimpangan aktif di dalam perangkat tidak melebihi nilai suhu aman.

Pertimbangkan apa yang terjadi pada suhu di daerah persimpangan perangkat ketika kita mulai dari suhu dingin (misal suhu ambien) dan operasikan perangkat, agar rata-rata disipasi daya tetap konstan. Pada awalnya, suhu persimpangan mulai naik, sehingga sebagian panas yang dihasilkan dikonduksikan ke kasing logam yang menyimpan sebagian panas saat suhunya naik. Panas kemudian mengalir ke heatsink (jika dipasang), yang mulai memanaskan, dan panas mulai mengalir ke udara di sekitarnya, pada suhu sekitar. Temperatur persimpangan, casing dan heatsink terus naik hingga akhirnya tercapai keseimbangan ketika total tingkat kehilangan panas ke suhu sekitar sama dengan disipasi daya di dalam perangkat.

Jadi, suhu persimpangan keadaan tunak akhir bergantung pada seberapa sulit hilangnya daya untuk lepas dari gradien suhu ke lingkungan, atau dengan kata lain pada 'hambatan termal' total antara

persimpangan di dalam perangkat dan media di sekitarnya (biasanya udara). Resistansi termal biasanya dinyatakan dalam $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, yang secara langsung menunjukkan berapa banyak kenaikan suhu akan terjadi pada kondisi mapan untuk setiap watt daya yang dihamburkan. Oleh karena itu untuk pembuangan daya yang diberikan, semakin tinggi resistansi termal, semakin tinggi kenaikan suhu, sehingga untuk meminimalkan kenaikan suhu perangkat, resistansi termal total antara perangkat dan udara di sekitarnya harus dibuat sekecil mungkin.

Perancang perangkat bertujuan untuk meminimalkan resistansi termal antara persimpangan semikonduktor dan casing pada perangkat, dan menyediakan permukaan pemasangan logam yang besar dan datar untuk meminimalkan resistansi termal antara casing dan heatsink. Perancang konverter harus memastikan kontak termal yang baik antara perangkat dan heatsink, biasanya oleh sambungan baut yang diolesi secara bebas dengan senyawa penghantar panas untuk mengisi celah mikroskopis apa pun, dan heatsink harus dirancang untuk meminimalkan resistansi termal terhadap udara (atau dalam beberapa kasus minyak atau air). Desain heatsink menawarkan satu-satunya ruang lingkup ril untuk mengurangi resistensi total, dan melibatkan pemilihan material, ukuran, bentuk, dan orientasi heatsink secara cermat, dan sistem penggerak udara yang terkait (lihat di bawah).

Salah satu kelemahan dari jalur termal yang baik antara persimpangan dan casing perangkat adalah permukaan pemasangan logam dapat secara elektrik 'on'. Ini menimbulkan kesulitan bagi para perancang konverter, karena pemasangan perangkat langsung pada heatsink menyebabkan hasil terakhir menjadi berbahaya. Selain itu, beberapa heatsink terpisah mungkin diperlukan untuk menghindari hubungan arus pendek. Alternatifnya adalah agar perangkat diisolasi secara elektrik dari heatsink menggunakan spacer mika tipis, tetapi kemudian ketahanan terhadap panas meningkat secara signifikan.

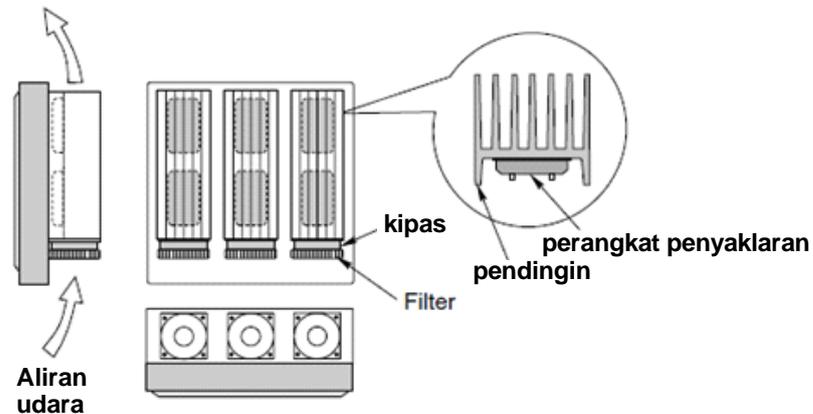
Semakin banyak perangkat yang dikemas dalam 'modul' dengan basis logam yang diisolasi secara elektrik untuk menyelesaikan masalah 'hidup'. Paket-paket berisi kombinasi transistor, dioda atau tiristor, dari mana berbagai rangkaian konverter dapat dibangun. Beberapa modul dapat dipasang pada satu heatsink, yang tidak harus diisolasi dari penutup atau kabinet. Mereka tersedia dalam peringkat yang cocok untuk konverter hingga ratusan kilowatt dan jangkauannya terus bertambah. Perkembangan ini, ditambah dengan perpindahan ke heatsink yang dibantu kipas telah menghasilkan pengurangan dramatis dalam ukuran keseluruhan konverter lengkap, sehingga konverter kendali 20 kW modern mungkin hanya seukuran tas kerja kecil.

Susunan unit pendingin dan pendinginan udara

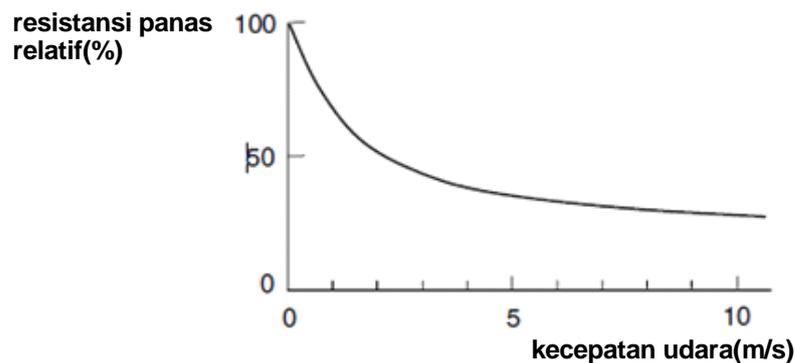
Faktor utama yang mengatur ketahanan termal dari pendingin adalah luas permukaan total, kondisi permukaan dan aliran udara. Sebagian besar konverter menggunakan heatsink aluminium yang diekstrusi, dengan beberapa sirip untuk meningkatkan luas permukaan pendinginan yang efektif dan menurunkan resistansi, serta dengan permukaan atau permukaan mesin untuk memasang perangkat.

Heatsink biasanya dipasang secara vertikal untuk meningkatkan konveksi udara alami. Permukaan akhir adalah hal yang penting, dengan aluminium anodisa hitam biasanya 30% lebih baik daripada jenis yang cerah.

Tata letak khusus untuk konverter daya sedang (misalkan 200 kW) ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Tata letak konverter yang menunjukkan unit pendingin dan kipas pendingin



Gambar 2.20 Sketsa yang menunjukkan pengaruh kecepatan udara terhadap tahanan termal yang efektif.

(Hambatan termal di udara diam diambil 100%.)

Kipas diposisikan di bagian atas atau bawah heatsink, untuk menarik udara eksternal ke atas dan membantu konveksi alami. Nilai bahkan aliran udara sederhana ditunjukkan oleh sketsa pada Gambar 2.20. Dengan kecepatan udara hanya 2 m/s, misalnya, hambatan termal dibelah dua dibandingkan dengan pengaturan yang didinginkan secara alami, yang berarti bahwa untuk kenaikan suhu tertentu, heatsink dapat memiliki setengah ukuran dari yang didinginkan secara alami. Hanya sedikit dari penghematan ruang ini yang diambil oleh para penggemar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Peningkatan besar dalam kecepatan udara membawa hasil yang semakin berkurang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20, dan juga menimbulkan kebisingan tambahan yang umumnya tidak diinginkan.

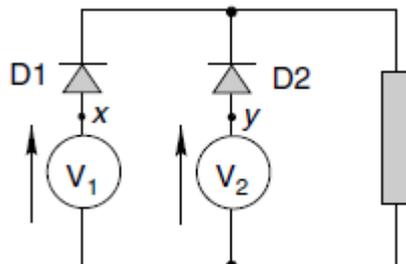
Kipas pendingin

Kipas pendingin memiliki motor luar-dalam yang dipasang di hub yang tidak terpisahkan, yaitu rotor berada di luar stator dan membawa bilah kipas. Rasio diameter/panjang rotor jauh lebih tinggi daripada kebanyakan motor konvensional untuk memberikan bentuk ramping pada rakitan kipas yang cocok untuk pemasangan di ujung *heatsink* yang diekstrusi (Gambar 2.19). Dengan demikian inersia rotor relatif tinggi, tetapi ini tidak penting karena inersia total didominasi oleh impeller, dan tidak diperlukan untuk akselerasi tinggi.

Tegangan listrik 50 atau 60 Hz kipas memiliki motor rotor kutub fasa tunggal rotor eksternal, yang biasanya berjalan pada kecepatan tetap sekitar 2700 putaran/menit dan memiliki masukan daya biasanya antara 10 dan 50 W. Torsi yang dibutuhkan dalam kipas kira-kira sebanding dengan kecepatan, sehingga kebutuhan torsi awal rendah dan motor dapat dirancang untuk memiliki efisiensi lari yang tinggi. Versi kecepatan lambat (tapi kurang efisien) digunakan di mana gangguan akustik menjadi masalah.

Soal Latihan

1. Dalam rangkaian Gambar Q.1, sumber tegangan dan dioda dapat diperlakukan sebagai ideal, dan bebannya adalah resistor. (Catatan: pertanyaan ini secara khusus ditujukan untuk memperkuat pemahaman tentang bagaimana dioda berperilaku: itu tidak mewakili rangkaian praktis.)

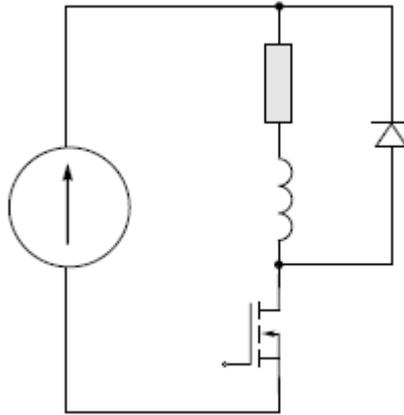


Gambar Q.1

Sketsa tegangan melintasi beban dalam kondisi berikut:

- (a) V_1 adalah sinusoid dengan amplitudo 20 V, dan V_2 adalah tegangan konstan +10V
 - (b) V_1 adalah sinusoid dengan amplitudo 20 V, dan V_2 adalah tegangan konstan -10V
 - (c) Sama seperti (a), kecuali bahwa dioda D1 ditempatkan di bawah, agak di atas V_1 .
2. Berapakah tegangan DC maksimum yang tersedia dari konverter jembatan yang dikendalikan penuh yang mencatu motor dan beroperasi dengan daya rendah 230 V?

3. Perkirakan sudut penyalaan yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan keluaran rata-rata 300 V dari konverter 3-fasa yang dikendalikan sepenuhnya yang dicatu dari stiff 415 V, kabel listrik 50 Hz. Asumsikan arus beban kontinu. Bagaimana sudut penyalaan harus berubah jika frekuensi catu adalah 60 Hz daripada 50 Hz?
4. Buat sketsa bentuk gelombang tegangan pada salah satu tiristor dalam konverter satu-fasa yang sepenuhnya dikendalikan dengan penundaan sudut penyalaan 60° . Asumsikan bahwa arus beban DC kontinu. Gambar 2.9 mungkin terbukti membantu.
5. Buat sketsa bentuk gelombang arus dalam catu daya AC ketika konverter fasa tunggal sepenuhnya terkendali dengan $\alpha = 45^\circ$ mencatu beban yang sangat induktif yang menarik arus 25 A. Jika catu AC 240 V, 50 Hz, dan kerugian dalam perangkat diabaikan, hitunglah puncak dan daya catu rata-rata per siklus.
6. Rangkaian helikopter DC sering dikatakan seperti transformator AC. Jelaskan apa artinya ini dengan mempertimbangkan hubungan masukan daya dan keluaran untuk beban motor induktif pencacah yang dicatu dengan tegangan rata-rata 20 V dari baterai 100 V. Asumsikan bahwa arus motor tetap konstan di seluruh pada 5 A.
7. Chopper step-down transistor 5 kHz yang beroperasi dari baterai 150 V mencatu beban R/L yang menarik arus hampir konstan sebesar 5 A.
Resistansi beban adalah 8V.
Memperlakukan semua perangkat sebagai ideal, perkirakan:
 - (a) tanda: rasio ruang helikopter;
 - (b) daya rata-rata dalam beban; dan
 - (c) daya rata-rata dari sumber.
8. Pertanyaan ini berkaitan dengan rangkaian switching pada Gambar Q.8, dan khususnya untuk fungsi dioda.
Beberapa kemungkinan jawaban untuk pertanyaan 'apa tujuan dioda' diberikan di bawah ini:
 - (a) untuk mencegah arus balik pada sakelar;
 - (b) untuk melindungi induktor dari tegangan tinggi;
 - (c) membatasi laju perubahan arus dalam persediaan;
 - (d) untuk membatasi tegangan melintasi MOSFET;
 - (e) untuk menghilangkan energi yang tersimpan dalam induktansi;
 Diskusikan jawaban-jawaban ini dan identifikasi jawaban mana yang benar.



Gambar Q.8

9. Dalam rangkaian Gambar Q.8, asumsikan bahwa tegangan catu adalah 100 V, dan bahwa drop tegangan ke depan dioda adalah 0,7 V. Beberapa jawaban umum untuk pertanyaan 'ketika arus freewheeling', berapakah tegangan yang melintasi MOSFET, diberikan di bawah ini:

- (a) 99,3 V;
- (b) 0,7 V;
- (c) 0 V;
- (d) tergantung pada induktansi;
- (e) 100,7 V.

Diskusikan jawaban-jawaban ini dan identifikasi mana yang benar.

REFERENSI

- Bose, B. K. (2006). *Power electronics and motor drives*. Elsevier, 917, 20.
- Beaty, H.W. and Kirtley, J.L. (1998) *Electric Motor Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Emadi, A., Lee, Y. J., & Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(6), 2237-2245.
- Hindmarsh, J. (1985) *Electrical Machines and their Applications (4th ed.)*. Oxford:Pergamon.
- Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes.
- Kenjo, T. (1991) *Electric Motors and their Controls*. New York: Oxford Science Publications.
- Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall.
- Lettl, J., & Kuzmanovic, D. (2010). Matrix converter induction motor drive employing direct torque control method. *PIERS Online*, 6(8), 711-715.