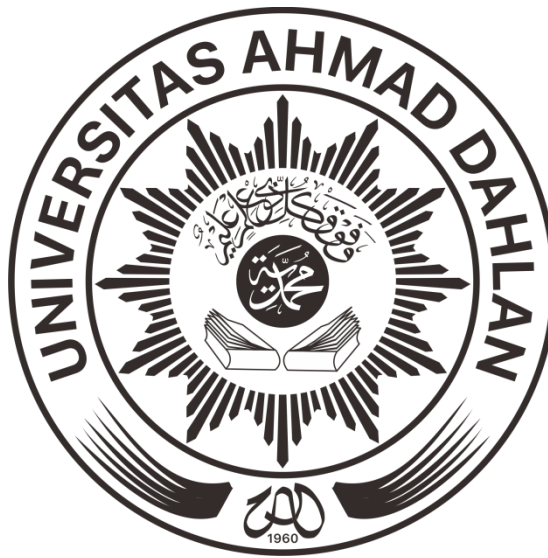


Diktat II Kuliah Kendali Motor:
**DASAR-DASAR MOTOR DC DAN
PENGEMUDIANNYA**



Tole Sutikno, Ph.D.

**TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN
YOGYAKARTA
2017/2018**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga diktat/bahan ajar "**Dasar-Dasar Motor DC dan Pengemudiannya**" ini dapat diselesaikan. Diktat ini disusun sebagai bahan ajar mahasiswa Strata 1 maupun Diploma jurusan Teknik Elektro.

Diktat ini disusun berdasarkan referensi dari beberapa buku, hasil penelitian dan data dari industri yang berkaitan. Diktat ini disusun menjadi 2 Bab utama yang membahas tentang dasar-dasar motor DC dan Teknik kemudinya. 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 2018

Penulis

Tole Sutikno

DAFTAR ISI

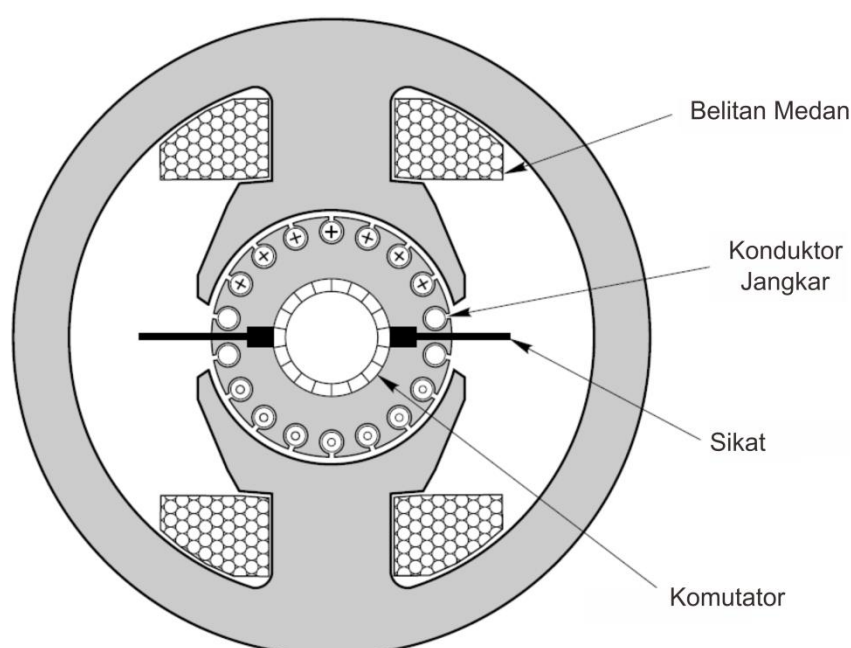
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAGIAN 1 MOTOR DC KONVENSIONAL.....	1
Pendahuluan.....	2
1. Produksi Torsi.....	4
1.1 Fungsi Komutator.....	6
1.2 Pengoperasian Komutator-Interpolar.....	7
2. Pergerakan GGL.....	11
2.1 Rangkaian Ekuivalen.....	13
3. Karakteristik Keadaan tunak Motor DC.....	15
3.1 Kecepatan Tanpa Beban.....	15
3.2 Contoh: Perhitungan Kinerja.....	16
3.3 Perilaku Ketika Diberi Beban.....	18
3.4 Kecepatan Dasar dan Pelemahan Medan.....	22
3.5 Reaksi Jangkar.....	24
3.6 Daya Keluaran Maksimum.....	25
4. Perilaku Transien-Arus Sentakan.....	27
4.1 Perilaku Dinamis dan Konstanta Waktu.....	27
5. Motor <i>Shunt</i>, Seri dan <i>Compound</i>.....	31
5.1 Motor <i>Shunt</i> - Karakteristik Operasi Kondisi Keadaan tunak.....	33
5.2 Motor Seri- Karakteristik Operasi Kondisi Keadaan Tunak.....	34
5.3 Motor Universal.....	37
5.4 Motor <i>Compound</i>	38
6. Pengoperasian Empat-Kuadran dan Pengereman Regeneratif.....	40
6.1 Pembalikan Regeneratif Kecepatan Penuh.....	42
6.2 Pengereman Dinamis.....	45
7. Motor Mainan.....	46
Pertanyaan Ulasan.....	48
BAGIAN 2 KEMUDI MOTOR DC.....	54
Pendahuluan.....	55
8. Kemudi DC Thyristor-Umum.....	57
8.1 Pengoperasian Motor Dengan Suplai Konverter.....	58
8.2 Bentuk Gelombang Arus Motor.....	59
8.3 Arus Diskontinyu.....	61

8.4 Impedansi Keluaran Konverter: <i>Overlap</i>	64
8.5 Operasi Empat Kuadran Dan Inversi.....	66
8.6 Kemudi Pembalik Konverter Tunggal.....	67
8.7 Kemudi Pembalik Konverter Ganda.....	68
8.8 Faktor Daya Dan Efek Catu	69
9. Pengaturan Pengendalian Untuk Kemudi DC	71
9.1 Kendali Arus	73
9.2 Kendali Torsi.....	75
9.3 Kendali Kecepatan.....	75
9.4 Daerah Operasi Keseluruhan	78
9.5 Umpan Balik Tegangan Jangkar Dan Kompensasi <i>IR</i>	78
9.6 Kemudi Tanpa Kendali Arus	78
10. Kemudi Motor DC Diumpangkan <i>Chopper</i>	79
10.1 Performa Kemudi Motor Diumpangkan <i>Chopper</i>	79
10.2 Karakteristik Kecepatan Torsi Dan Pengaturan Kendali.....	82
11. Kemudi Servo DC	84
11.1 Motor Servo.....	85
11.2 Kendali Posisi.....	86
12. Kemudi Yang Dikendalikan Secara Digital	90
Pertanyaan Ulasan	92

BAGIAN 1 MOTOR DC KONVENSIONAL

PENDAHULUAN

Hingga tahun 1980-an, mesin dc konvensional dengan sikat (*brush*) menjadi pilihan pada aplikasi yang memerlukan kendali kecepatan atau torsi. Sejumlah besar aplikasi masih mempertahankan motor dc meskipun pangsa pasar menurun karena berpindah ke penggunaan motor induksi. Motor induksi ini umumnya menggunakan inverter. Aplikasi penggunaan motor dc antara lain pada pabrik penggilingan baja, traksi kereta api, hingga beragam industri penggerak, robot, printer dan servo presisi. Kisaran daya motor dc beragam, mulai dari nominal megawatt hingga hanya beberapa watt seperti yang digunakan pada mainan. Struktur dasar motor dc konvensional ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Motor dc konvensional.

Konstruksi motor dc memiliki dua rangkaian terpisah. Sepasang terminal kecil terhubung ke belitan medan (*field winding*) yang mengelilingi masing-masing kutub secara seri. Pada kondisi tunak, semua daya masukan ke belitan medan di-disipasi sebagai panas, tidak ada yang dikonversi menjadi daya keluaran mekanis. Terminal utama mengalirkan arus daya atau arus kerja ke sikat yang membuat kontak geser ke belitan jangkar (*armature*) pada rotor.

Seperti pada mesin listrik lainnya, motor dc dapat dirancang menyesuaikan tegangan catu yang diinginkan. Namun batas nilai tegangan yang digunakan tidak lebih rendah dari sekitar 6 V atau lebih tinggi dari 700 V. Batas bawah disebabkan oleh sikat menimbulkan penurunan

tegangan (*volt-drop*) yang tidak dapat dihindari sekitar 0,5-1 V. Di sisi lain, untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi membutuhkan isolasi segmen komutator yang berimbas pada peningkatan biaya. Ketika motor bekerja pada kecepatan yang sangat tinggi, maka dapat terjadi masalah pada sikat dan komutator. Motor dc kecil, misalkan dengan daya keluaran (*output*) ratusan watt, dapat berjalan sekitar 12000 putaran/menit, namun mayoritas motor dc menengah dan motor dc besar biasanya dirancang untuk kecepatan di bawah 3000 putaran/menit.

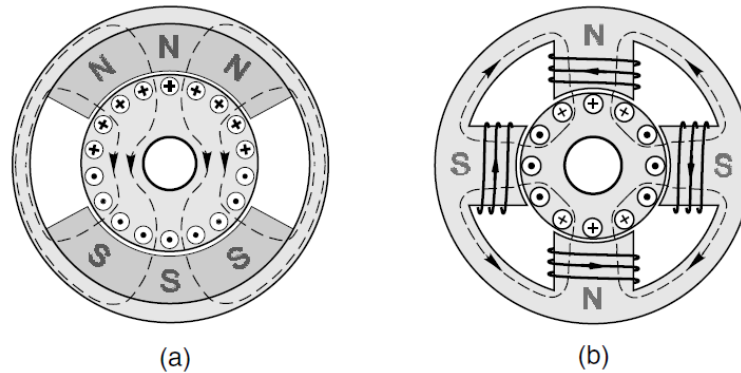
Pada perkembangannya, banyak motor yang dicatu dengan kemudi elektronika daya (*power-electronic drives*) yang mengambil daya dari ac dan mengubahnya menjadi dc sebagai tegangan masukan (*input*) motor. Karena tegangan utama cenderung distandarisasi (misal 100 V, 220 V-240 V, atau 380-440 V, 50 atau 60 Hz), maka motor dibuat dengan tegangan pengenal yang sesuai dengan rentang keluaran dc dari konverter.

Seperti yang telah disebutkan bahwa motor dapat disesuaikan dengan daya, kecepatan dan ukuran tertentu dalam kisaran tegangan yang berbeda. Prinsip dasarnya adalah mengubah jumlah lilitan dan ukuran kawat untuk membentuk kumparan mesin. Misalnya motor 12 V 4 A, dapat dibuat untuk beroperasi pada tegangan 24 V. Caranya yaitu mengganti kawat yang memiliki luas penampang dengan ukuran setengah dari kawat sebelumnya, dan melilitkan kawat sebanyak dua kali lebih banyak dari lilitan kawat sebelumnya. Kecepatan penuh pada 24 V akan sama seperti kecepatan penuh pada 12 V, arus pengenal menjadi 2 A dari arus pengenal sebelumnya yaitu 4 A. Daya masukan dan daya keluaran tidak akan berubah, bentuk fisik secara eksternal tidak mengalami perubahan secara signifikan kecuali ukuran terminal yang mungkin menjadi sedikit lebih kecil.

Secara umum, motor dc diklasifikasikan sebagai *shunt*, seri dan *compound-wound*. Tidak ada perbedaan mendasar antara klasifikasi tersebut, dan hanya mencerminkan cara medan dan rangkaian jangkar saling terhubung. Perlu diketahui bahwa jumlah kutub pada mesin ac dapat menentukan kecepatan, sedangkan jumlah kutub pada mesin dc adalah konsekuensi kecil oleh pengguna. Penggunaan dua atau empat kutub dalam ukuran kecil atau menengah pada motor dc ternyata lebih ekonomis, dan jumlah yang lebih banyak lagi misal sepuluh atau dua belas atau lebih dalam ukuran besar. Tetapi perbedaan bagi pengguna adalah bahwa tipe 2 kutub akan memiliki dua sikat pada 180°, 4 kutub memiliki empat sikat pada 90°, dan seterusnya. Tidak ada perbedaan mendasar sejauh menyangkut karakteristik operasi, namun tipe 2 kutub lebih sederhana daripada tipe 4 kutub.

1. PRODUKSI TORSI

Torsi dihasilkan oleh interaksi antara konduktor penggerak arus aksial pada rotor dan aliran (*aliran*) magnetik radial yang dihasilkan oleh stator. Aliran atau eksitasi dapat dilengkapi dengan magnet permanen, seperti pada Gambar 1.2(a), atau dengan cara belitan medan pada Gambar 1.1 dan 1.2(b).



Gambar 1.2 Sistem eksitasi (medan) untuk motor dc (a) magnet permanen 2 kutub; (b) *wound field* 4 kutub.

Motor dengan magnet permanen memiliki nilai keluaran mulai dari beberapa watt hingga beberapa kilowatt, sedangkan mesin *wound-field* memiliki keluaran sekitar 100 W hingga berkisar MW. Keuntungan dari jenis magnet permanen adalah tidak ada pasokan listrik yang diperlukan untuk medan, dan ukuran keseluruhan motor bisa lebih kecil. Di sisi lain, kekuatan medan tidak dapat bervariasi, sehingga mengesampingkan satu opsi untuk kendali.



Plate 1 Gambaran dari motor dc 4-kutub yang dibelah. Belitan jangkar miring pada rotor terhubung di ujung kanan melalui riser ke segmen komutator. Ada empat set sikat, dan masing-masing lengan sikat

memegang empat kotak sikat. Gulungan berpotongan yang mengelilingi dua dari empat kutub terlihat dekat dengan belitan akhir dinamo kiri.

Magnet ferit telah digunakan selama bertahun-tahun. Magnet ini relatif murah dan mudah dibuat namun produk energi (ukuran efektifitas sebagai sumber eksitasi) buruk. Magnet tanah jarang (misal: Neodymium-besi-boron (Nd-Fe-B) atau samarium-kalbat) menyediakan produk energi yang jauh lebih tinggi dan menghasilkan rasio torsi/volume tinggi. Magnet ini digunakan dalam motor servo berkinerja tinggi. Namun magnet tanah jarang relatif mahal dan sulit dibuat. Magnet Nd-Fe-B memiliki produk energi tertinggi tetapi hanya dapat dioperasikan pada suhu di bawah sekitar 150°C, yang tidak mencukupi untuk beberapa motor dengan kinerja tinggi.

Meskipun medan magnet sangat penting untuk pengoperasian motor, namun tidak ada daya keluaran mekanik yang benar-benar berasal dari sistem medan. Eksitasi bertindak seperti katalis dalam reaksi kimia, memungkinkan membuat konversi energi namun tidak berkontribusi pada keluaran.

Rangkaian daya utama terdiri dari satu set gulungan koil dalam celah (*slot*) pada rotor, yang dikenal sebagai jangkar. Arus dimasukkan ke dalam dan keluar dari rotor melalui sikat karbon yang melakukan kontak geser dengan komutator, yang terdiri dari segmen tembaga terisolasi yang dipasang pada silinder sebelumnya.

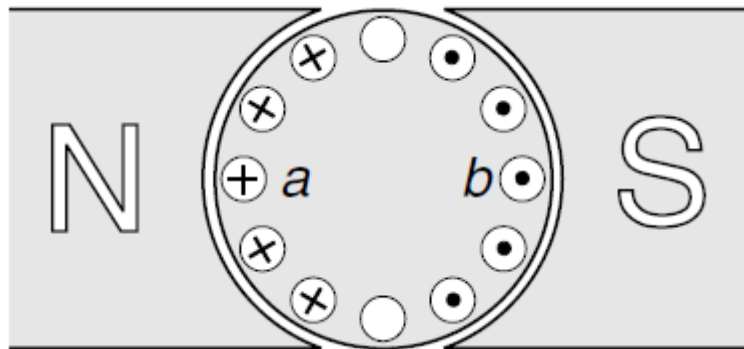
Energi listrik yang akan dikonversi menjadi keluaran mekanis harus dimasukkan ke dalam motor melalui sikat dan komutator. Untuk memastikan operasi kerja motor bebas masalah, maka komutator perlu dijaga kebersihannya, sikat dan pegas yang terkait perlu diservis secara teratur karena terjadi kontak listrik geser kecepatan tinggi. Sikat dapat terjadi aus, namun jika diatur dengan benar maka dapat bertahan selama ribuan jam. Serpihan sikat dalam bentuk partikel grafit terbawa keluar oleh ventilasi udara. Setiap penumpukan debu pada isolasi belitan motor tegangan tinggi beresiko terjadi korsleting/hubung singkat (*short circuit*), sementara serpihan pada komutator dapat menyebabkan kesalahan "*flashover*" (yaitu korsleting listrik tegangan tinggi yang terjadi melalui udara di antara konduktor yang terpapar.).

Panjang aksial komutator tergantung pada arus yang ditangani. Motor kecil biasanya memiliki satu sikat di setiap sisi komutator, sehingga komutator menjadi pendek. Namun motor arus besar memungkinkan untuk memiliki banyak sikat yang dipasang pada lengan yang sama, masing-masing dengan sikat box-nya sendiri. Serta dengan semua sikat pada satu lengan yang terhubung secara paralel melalui kabel tembaga fleksibel. Panjang komutator kemudian dapat dibandingkan

dengan panjang aktif jangkar (yaitu bagian yang membawa konduktor yang terkena aliran radial).

1.1 Fungsi Komutator

Terdapat berbagai pengaturan belitan yang berbeda pada motor jangkar motor dc. Tujuan utama komutator adalah untuk memastikan bahwa pola aliran arus dalam rotor selalu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Pola arus rotor (jangkar) pada motor dc 2 kutub.

Dapat dilihat pada Gambar 1.3 bahwa semua konduktor yang terletak di bawah kutub N membawa arus dalam satu arah, sedangkan semua yang di bawah kutub S membawa arus dalam arah yang berlawanan. Oleh karena itu, semua konduktor di bawah kutub N akan mengalami gaya ke bawah (yang sebanding dengan kerapatan aliran radial B dan arus jangkar I), sementara semua konduktor di bawah kutub S akan mengalami gaya ke atas yang sama. Dengan demikian, torsi dihasilkan pada rotor dengan besaran yang sebanding dengan kerapatan aliran dan arus. Dalam implementasinya, kerapatan aliran tidak akan sepenuhnya seragam di bawah kutub, sehingga gaya pada beberapa konduktor jangkar akan lebih besar daripada yang lain. Total torsi yang dikembangkan diberikan oleh

$$T = K_T \Phi I \tag{1.1}$$

dimana Φ adalah total aliran yang dihasilkan oleh medan, dan K_T adalah nilai konstan suatu motor. Pada sebagian besar motor, aliran tetap konstan sehingga torsi motor berbanding lurus dengan arus jangkar. Jika membutuhkan motor untuk menghasilkan torsi konstan pada semua kecepatan, maka arus jangkar harus dijaga agar tetap konstan. Perangkat kendali standar biasanya telah mencakupi kebutuhan menjaga arus konstan tersebut. Pada persamaan (1.1)

dapat dilihat bahwa arah torsi dapat dibalik dengan membalikkan arus jangkar (I) atau aliran (Φ). Cara tersebut dapat dilakukan untuk memutar balik putaran motor atau untuk melakukan pengereman regeneratif.

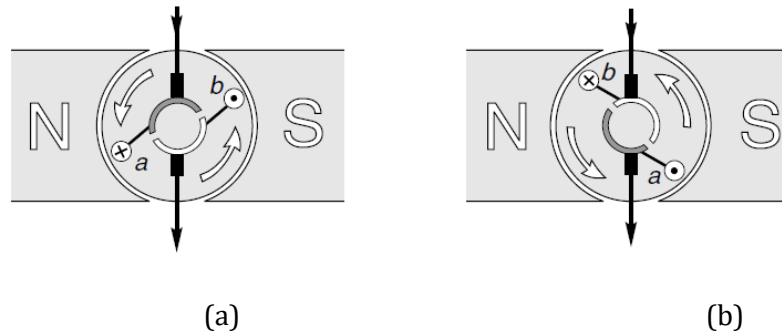
Pada Gambar 1.3, jika rotor berputar hanya beberapa derajat maka salah satu dari lima konduktor yang berada di bawah kutub akan berpindah ke daerah yang tidak ada aliran radial sebelum terjadi pergerakan selanjutnya. Sehingga hanya ada empat konduktor yang menghasilkan tenaga dan torsi akan berkurang. Untuk menghindari variasi torsi yang tidak diinginkan, kebanyakan motor memiliki kumparan yang lebih banyak daripada yang ditunjukkan pada Gambar 1.3. Torsi yang halus banyak dibutuhkan oleh sebagian besar aplikasi untuk menghindari gerakan dan resonansi dalam transmisi dan beban.

Secara umum, semakin banyak jumlah kumparan dan segmen komutator maka semakin baik. Rotor menjadi identik di setiap posisi dan torsi menjadi sangat halus ketika jumlah kumparan tidak terbatas, tentu saja tidak mungkin terjadi. Untuk kepraktisan dan alasan ekonomis, jumlah celah pada motor besar lebih banyak (biasanya lebih dari seratus kumparan) sehingga riak pada torsi keluarannya sangat sedikit.

1.2 Pengoperasian Komutator-Interpolar

Pada ab di Gambar 1.3, untuk setengah putaran yaitu ketika sisi a berada pada kutub N dan sisi b berada pada kutub S, arus harus positif di dalam a dan negatif di dalam b untuk menghasilkan torsi positif. Untuk setengah putaran lainnya, ketika sisi a berada pada kutub S dan sisi b berada pada kutub N, arus harus mengalir ke arah yang berlawanan melalui koil agar menghasilkan torsi positif. Pembalikan arus ini terjadi di masing-masing kumparan saat melewati sumbu interpolar (*interpole*), kumparan sedang “beralih putar” oleh komutator yang bergerak pada sikat. Setiap kali kumparan mencapai posisi ini, maka dikatakan mengalami komutasi (*commutation*). Oleh karena kumparan yang relevan pada Gambar 1.3 tidak memiliki arus untuk menunjukkan bahwa arusnya sedang dalam proses perubahan dari positif ke negatif.

Mekanisme pembalikan arus ditunjukkan pada Gambar 1.4. Pada gambar tersebut menunjukkan koil tunggal yang dimasukkan melalui komutator dan sikat dengan arus yang selalu mengalir di sikat atas.

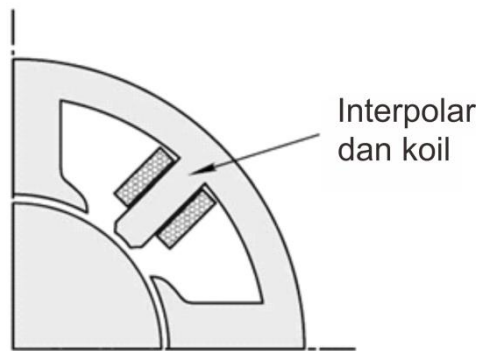


Gambar 1.4 Pembalik arus dari komutator pada motor kumparan tunggal.

Pada Gambar 1.4a, sisi kumparan a berada pada kutub N dan membawa arus positif karena terhubung dengan segmen komutator yang diarsir dan pada gilirannya diumpankan dari sikat atas. Oleh karena itu sisi a terkena kerapatan aliran yang diarahkan dari kiri (N) ke kanan (S) sehingga mengalami gaya ke bawah. Gaya tersebut akan tetap konstan ketika sisi koil tetap berada di bawah kutub N. Sebaliknya, sisi b memiliki arus negatif tetapi juga terletak pada kerapatan aliran yang diarahkan dari kanan ke kiri, sehingga mengalami gaya ke atas. Dengan demikian ada torsi berlawanan arah jarum jam pada rotor.

Ketika rotor berputar ke posisi seperti pada Gambar 1.4b, arus di kedua sisi dibalik. Karena sisi b diumpankan dengan arus positif melalui segmen komutator yang tidak diarsir. Arah gaya pada setiap sisi kumparan dibalik sesuai yang diinginkan agar torsi tetap searah jarum jam. Torsi tetap konstan terlepas dari periode singkat ketika koil berada di luar pengaruh aliran dan mengalami komutasi (pembalikan arus). Dalam jangkar multi koil yang sebenarnya, busur komutator jauh lebih kecil daripada yang ditunjukkan pada Gambar 1.4 dan hanya satu dari banyak kumparan dibalik pada suatu waktu, sehingga torsi tetap hampir konstan, terlepas dari posisi motor.

Kendala yang terjadi dalam mencapai komutasi yang baik disebabkan induktansi diri (*self-inductance*) dari koil jangkar dan energi terkait yang tersimpan. Rangkaian induktif cenderung menahan perubahan arus, dan jika pembalikan arus belum sepenuhnya selesai pada saat sikat bergerak dari segmen yang bersangkutan, maka akan ada percikan disisi sikat. Pada motor kecil beberapa percikan dianggap dapat ditoleransi. Namun dalam motor *wound-field* menengah dan besar, kutub stator tambahan kecil yang dikenal sebagai interpolar (kompos) disediakan untuk meningkatkan komutasi sehingga meminimalkan percikan. Kutub tambahan tersebut terletak di tengah-tengah antara kutub medan utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Interpolar biasanya tidak diperlukan dalam motor magnet permanen karena tidak adanya besi stator yang dekat dengan kumparan rotor menghasilkan induktansi kumparan jangkar yang lebih rendah.



Gambar 1.5 Lokasi interpole dan interpole *winding*.

Tujuan utama interpolar adalah untuk menggerakkan GGL/Gaya Gerak Listrik (EMF/*Electromagnetic Field*) dalam koil yang sedang mengalami komutasi, sedemikian rupa untuk mempercepat pembalikan arus yang diinginkan sehingga mencegah percikan. GGL yang dibutuhkan sebanding dengan arus (arus jangkar) yang harus dikomutasi, dan dengan kecepatan rotasi. GGL yang benar dicapai dengan melewati arus jangkar melalui kumparan pada interpolar, sehingga membuat aliran dari interpolar sebanding dengan arus jangkar. Oleh karena itu kumparan interpolar terdiri dari beberapa belitan konduktor tebal yang dihubungkan secara seri dengan jangkar.

1.3 Kendali Torsi

Untuk aplikasi yang membutuhkan motor beroperasi dengan torsi yang ditentukan terlepas dari kecepatan (misalnya dalam tegangan saluran listrik), maka cukup dengan mengumpankan sinyal referensi arus langsung ke pengendali arus (biasanya melalui torsi "*torque ref*" pada papan kendali). Hal ini karena torsi berbanding lurus dengan arus, sehingga pengendali arus sama dengan pengendali torsi. Torsi dapat dipercepat dengan menggunakan sinyal kompensasi inersia transien yang dapat dengan mudah ditambahkan ke kebutuhan torsi.

Dalam mode kendali arus, arus tetap konstan pada nilai yang ditetapkan dan kecepatan berputar stabil ditentukan oleh beban. Jika sinyal referensi torsi diatur pada misalnya 50%, dan motor pada awalnya diam, maka akan berakselerasi dengan arus konstan dari setengah nilai pengenalnya sampai torsi beban sama dengan torsi motor. Tentu saja, jika motor berjalan tanpa beban apapun, maka motor berakselerasi dengan cepat. Tegangan yang diberukan naik sehingga selalu tetap lebih tinggi daripada GGL balik oleh jumlah yang dibutuhkan untuk mengarahkan arus yang ditentukan ke jangkar. Akhirnya motor akan mencapai kecepatan (sedikit di atas

normal penuh kecepatan) di mana tegangan keluaran konverter telah mencapai batas atas. Dan karena tidak mungkin lagi untuk mempertahankan arus yang diatur, setelah itu kecepatan motor akan stabil.

Dari diskusi diatas dapat diasumsikan bahwa torsi sebanding dengan arus jangkar, yang benar hanya jika fluks dipertagankan konstan, yang pada gilirannya mengharuskan arus medan menjadi konstan. Karenanya di semua kemudi ukuran kecil dipasok dari konverter thyristor dengan umpan balik arus. Variasi dalam resistansi rangkaian medan karena perubahan suhu, dan/atau perubahan tegangan catu utilitas, dengan demikian secara otomatis dikompensasi dan fluks dipertahankan pada nilai pengenalnya.

2. PERGERAKAN GGL

Ketika jangkar diam, tidak ada gerakan GGL yang diinduksi didalamnya. Tetapi ketika rotor berputar, maka konduktor jangkar memotong aliran magnetik radial dan GGL diinduksi di dalamnya. GGL bergantian akan diinduksi ketika rotor berputar pada setiap koil pada jangkar yang bersangkutan. Koil ab pada Gambar 1.3, sisi a akan bergerak ke atas melalui aliran jika rotasi searah jarum jam, dan GGL yang dihasilkan juga searah jarum jam. Pada saat yang sama, sisi “kembali” dari koil b akan bergerak ke bawah, sehingga arah GGL berlawanan arah jarum jam dengan besaran yang sama. Oleh karena itu, GGL yang dihasilkan dalam koil akan menjadi dua kali lipat pada sisi koil. GGL ini tetap konstan selama hampir setengah putaran, di mana saat itu sisi koil memotong aliran yang konstan. Untuk waktu yang relatif singkat, ketika koil tidak memotong aliran, GGL akan menjadi nol. Kemudian koil memotong aliran lagi, namun setiap sisi berada pada kutub lain, sehingga GGL berada di arah yang berlawanan. Sehingga bentuk gelombang GGL yang dihasilkan dalam setiap koil merupakan gelombang bolak-balik persegi panjang, dengan magnitudo dan frekuensi sebanding dengan kecepatan rotasi.

Pada motor dc, sikat tidak bergerak, sehingga meskipun segmen tertentu selalu berganti, namun sirkuit yang terletak di antara kedua sikat selalu terdiri dari jumlah kumparan yang sama dengan orientasi yang sama sesuai dengan kutub. Sehingga GGL pada sikat yang dihasilkan adalah langsung (konstan) dan tidak bergantian. Besar GGL tergantung pada posisi sikat di sekitar komutator. Namun sikat selalu ditempatkan pada titik puncak GGL bolak-balik yang diinduksi dalam jangkar. Sehingga komutator dan sikat dapat dianggap sebagai perangkat mekanis yang mengubah GGL bolak-balik dalam rangka referensi (*reference frame*) berputar ke GGL langsung dalam rangka stasioner (*stationary frame*). Perangkat ini sangat efektif, namun karena perangkat ini adalah sistem mekanis, maka kerap terjadi keausan di dalamnya.

Seperti yang telah diketahui bahwa untuk mendapatkan torsi yang halus, maka memerlukan banyak koil dan komutator. Jika hanya menggunakan beberapa lilitan jangkar, maka GGL akan memiliki riak pada tingkat dc rata-rata. Semakin banyak kumparan maka semakin kecil riak yang dihasilkan dan semakin baik dc yang dihasilkan. Riak kecil didapatkan dengan sejumlah segmen yang terbatas jarang terjadi masalah pada motor, namun kadang kali menimbulkan kesulitan ketika mesin dc digunakan untuk memberikan sinyal umpan balik kecepatan dalam sistem *loop* tertutup.

Dalam suatu kondisi, sebuah konduktor dengan panjang l bergerak dengan kecepatan v melalui aliran B , gerakan GGL yang diinduksi diberikan oleh $e = Blv$. Dalam mesin yang lengkap memiliki banyak konduktor yang terhubung seri. Kecepatan linier (v) dari mesin lama digantikan

oleh kecepatan tangensial dari konduktor rotor yang sebanding dengan kecepatan rotasi (n), dan rata-rata kecepatan aliran yang dipotong oleh masing-masing konduktor (B) berhubungan langsung dengan total aliran (Φ). Jika digabungkan bersama faktor-faktor yang berpengaruh lainnya (jumlah konduktor, jari-jari, panjang rotor aktif) menjadi satu konstanta tunggal (K_E), berarti besar GGL (E) yang dihasilkan pada sikat diberikan oleh

$$E = K_E \Phi n \quad (2.1)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peran kunci aliran yaitu tidak ada tegangan yang dihasilkan hingga medan dihidupkan, tidak peduli seberapa cepat motor berputar. Setelah medan diberi energi, tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan putaran. Sehingga jika arah rotasi dibalik maka polaritas GGL yang dihasilkan juga dibalik. Perlu diingat bahwa GGL hanya bergantung pada alisan dan kecepatan, terlepas dari apakah rotasi disediakan oleh beberapa sumber eksternal (yaitu ketika mesin digerakkan sebagai generator) atau ketika rotasi diproduksi oleh mesin itu sendiri (yaitu ketika mesin bergerak sebagai motor).

Telah disebutkan bahwa aliran biasanya konstan pada nilai penuhnya, di mana persamaan kasus (1.1) dan (2.1) dapat ditulis dalam bentuk

$$T = k_t I \quad (2.2)$$

$$E = k_e \omega \quad (2.3)$$

di mana k_t adalah konstanta torsi motor, k_e adalah konstanta GGL, dan ω adalah kecepatan sudut dalam radian/detik. Dalam sistem SI (standar internasional), satuan untuk k_t adalah satuan torsi (newton meter) dibagi dengan satuan arus (ampere), yaitu Nm/A. Dan satuan unit k_e adalah volt/radian/detik. (Namun k_e lebih sering diberikan dalam volts/1000 putaran/menit).

Konstanta torsi (Nm/A) dan konstanta GGL (V/radian/detik), yang mengukur fenomena fisik yang sangat berbeda, pada kenyataannya sama yaitu $1 \text{ Nm/A} = 1 \text{ V/radian/detik}$. Alternatif agar tidak membingungkan adalah dengan mengganti satu set unit secara bertahap dengan yang setara, misal

$$\begin{aligned} \frac{(\text{newton})(\text{meter})}{\text{ampere}} &= \frac{\text{joule}}{\text{ampere}} = \frac{(\text{watt})(\text{detik})}{\text{ampere}} \\ &= \frac{(\text{volt})(\text{ampere})(\text{detik})}{\text{ampere}} \\ &= (\text{volt})(\text{detik}) \end{aligned}$$

Dapat dilihat bahwa $1 \text{ volt} \times 1 \text{ detik} = 1 \text{ weber}$. Hal ini disebabkan karena produksi torsi dan generasi gerakan GGL disebabkan oleh aksi katalitik dari aliran magnet. Dalam satuan SI, konstanta torsi dan GGL sama yaitu $k_t = k_e = k$. Persamaan torsi dan GGL dapat disederhanakan sebagai

$$T = kI \quad (2.4)$$

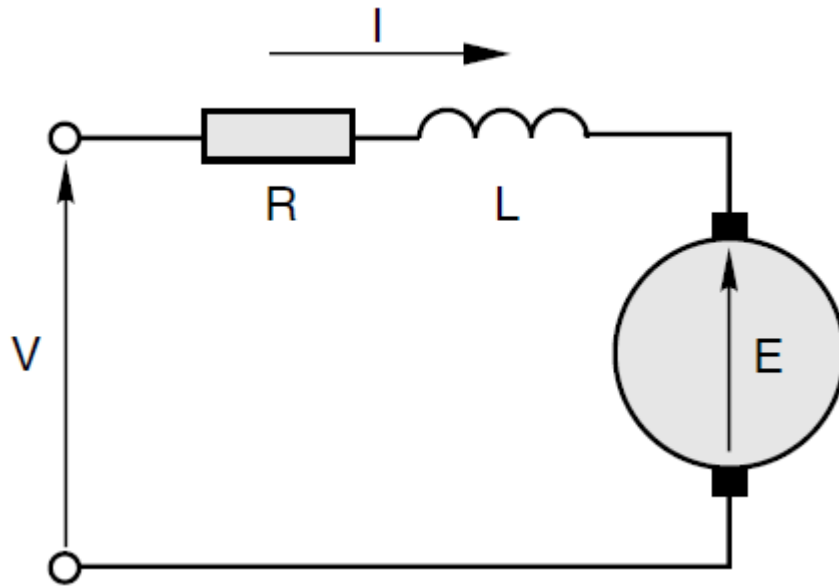
$$E = k\omega \quad (2.5)$$

Kedua persamaan tersebut dan persamaan tegangan jangkar yang akan dibahas dapat digunakan untuk memprediksi semua aspek perilaku motor dc.

Meskipun telah dibahas gerakan GGL dalam konduktor, namun tidak boleh mengabaikan fakta bahwa gerakan GGL juga diinduksi dalam tubuh rotor. Misalnya jika mempertimbangkan gerigi rotor, maka harus jelas bahwa hal itu akan memiliki GGL bergantian di dalamnya sebagai rotor berputar dengan cara yang sama seperti GGL diinduksi dalam konduktor yang berdekatan. Misal dalam mesin yang ditunjukkan pada Gambar 1.1, ketika GGL dalam gerigi pada kutub N positif, maka GGL di gerigi yang berlawanan secara diametrik (pada kutub S) akan negatif. Mengingat bahwa baja rotor menghantarkan listrik, GGL ini cenderung mengatur arus sirkulasi dalam tubuh rotor. Sehingga untuk mencegah hal ini terjadi, rotor dibuat bukan dari bahan padat, namun dengan laminasi baja tipis (biasanya kurang dari 1 mm) yang memiliki lapisan terisolasi untuk mencegah aliran arus yang tidak diinginkan. Jika rotor tidak dilaminasi, arus induksi tidak hanya akan menghasilkan limbah panas dalam jumlah besar tetapi juga mengerahkan torsi pengereman yang besar.

2.1 Rangkaian Ekivalen

Rangkaian ekivalen untuk mesin konvensional ditunjukkan pada Gambar 2.1. Tegangan V adalah tegangan yang diterapkan pada terminal jangkar (melalui sikat), dan E adalah gerak maju yang dikembangkan secara internal. Resistansi dan induktansi dari jangkar diwakili oleh R dan L pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen motor dc.

Konvensi tanda yang diadopsi adalah yang biasa ketika mesin beroperasi sebagai motor. Dalam kondisi motorik, gerak GGL E selalu berlawanan dengan tegangan yang diberikan V , sehingga disebut dengan "GGL balik (*back EMF*)". Agar arus masuk ke motor, maka V harus lebih besar dari E , persamaan tegangan rangkaian jangkar diberikan oleh

$$V = E + IR + L \frac{dI}{dT} \quad (2.6)$$

Istilah terakhir dalam persamaan (2.6) menunjukkan penurunan tegangan induktif karena induktansi diri jangkar. Tegangan ini sebanding dengan laju perubahan arus, sehingga dalam keadaan tunak (*steady-state*) saat arus konstan, istilah tersebut akan menjadi nol dan dapat diabaikan. Akan terlihat bahwa induktansi jangkar memiliki efek yang tidak disukai dalam kondisi transien (kondisi sementara), tetapi juga bermanfaat untuk menghaluskan bentuk gelombang arus ketika motor dicatu oleh penyearah terkendali.

3. KARAKTERISTIK KEADAAN TUNAK MOTOR DC

Pertanyaan yang selalu muncul dari sudut pandang pengguna adalah sejauh mana kecepatan turun ketika diberikan beban, dan bagaimana variasi kecepatan dengan tegangan yang diberikan. Informasi tersebut biasanya dipaparkan dalam bentuk karakteristik keadaan tunak yang menunjukkan bagaimana motor berperilaku ketika ada efek transien (disebabkan misalnya oleh perubahan beban yang tiba-tiba) telah hilang dan kondisi menjadi stabil lagi. Karakteristik keadaan tunak biasanya lebih mudah diprediksi daripada karakteristik transien, dan untuk mesin dc, dapat disimpulkan dari rangkaian ekivalen sederhana pada Gambar 1.6.

Dalam kondisi keadaan tunak, arus jangkar I adalah konstan dan persamaan (2.6) disederhanakan menjadi

$$V = E + IR \quad \text{atau} \quad I = \frac{(V - E)}{R} \quad (3.1)$$

Persamaan ini tidak memungkinkan untuk menemukan arus jika diketahui tegangan yang diberikan, kecepatan (dari E didapatkan melalui persamaan (2.5)) dan resistansi jangkar, dan torsi dari persamaan (2.4). Sebagai alternatif, dapat dimulai dengan torsi dan kecepatan dan mencari tahu tegangan apa yang dibutuhkan. Selanjutnya akan dibahas bagaimana menetapkan hubungan antara kecepatan tanpa beban dan tegangan jangkar sebagai dasar kendali kecepatan.

3.1 Kecepatan Tanpa Beban

Gerak motor tanpa beban dimaksudkan bahwa motor sedang berputar ringan, sehingga satu-satunya hambatan mekanik adalah karena gesekannya sendiri. Dalam motor apa pun, torsi gesek akan kecil, dan hanya torsi penggerak kecil yang dibutuhkan untuk menjaga motor tetap berjalan. Karena torsi motor sebanding dengan arus (persamaan (2.4)), maka arus tanpa beban juga akan kecil. Jika diasumsikan bahwa arus tanpa beban sebenarnya nol, perhitungan kecepatan tanpa beban menjadi sangat sederhana. Dapat dicatat dari persamaan (3.1) bahwa arus nol menyiratkan GGL balik sama dengan tegangan yang diberikan, sedangkan persamaan (2.1) menunjukkan bahwa GGL balik sebanding dengan kecepatan. Karenanya dalam kondisi tanpa beban (torsi nol) yang sebenarnya, maka diperoleh

$$V = E = K_E \Phi n \quad \text{atau} \quad n = \frac{V}{K_E \Phi} \quad (3.2)$$

dimana n adalah kecepatan.

Dari persamaan (3.2) dapat dilihat bahwa kecepatan tanpa beban berbanding lurus dengan tegangan jangkar, dan berbanding terbalik dengan aliran medan. Pada kasus ini, aliran dibuat konstan untuk menunjukkan melalui contoh bahwa perkiraan yang digunakan dalam mencapai persamaan (3.2) dibenarkan dalam praktiknya. Kemudian, dapat menggunakan contoh yang sama untuk mempelajari karakteristik kecepatan torsi.

3.2 Contoh: Perhitungan Kinerja

Misal sebuah motor magnet permanen 500 V, 9.1 kW, 20 A dengan resistansi jangkar 1Ω . Nilai-nilai tersebut berarti bahwa tegangan operasi normal adalah 500 V, arus ketika motor mendapat beban penuh adalah 20 A, dan daya keluaran mekanis dalam kondisi beban penuh adalah 9.1 kW). Ketika dicatu pada 500 V, motor tanpa beban berjalan pada 1040 putaran/menit, arus yang dihasilkan 0.8 A.

Setiap kali motor berjalan pada kecepatan tetap, torsi yang dihasilkan harus sama (dan berlawanan) dengan total torsi yang berlawanan atau torsi beban. Jika torsi motor kurang dari torsi beban, maka motor akan melambat, dan jika torsi motor lebih tinggi dari torsi beban maka menjadi akselerasi (semakin cepat). Dari persamaan (2.2), dapat dilihat bahwa torsi motor ditentukan oleh arusnya, sehingga dapat dibuat pernyataan bahwa, dalam kondisi keadaan tunak, arus motor akan ditentukan oleh torsi beban mekanik. Ketika menggunakan rangkaian ekuivalen (Gambar 2.1) dalam kondisi keadaan tunak, maka perlu dibiasakan dengan gagasan bahwa arus ditentukan oleh torsi beban. Yaitu salah satu “*masukan*” utama yang akan memungkinkan untuk memecahkan persamaan rangkaian adalah torsi beban mekanis.

Kembali ke contoh, perhatikan bahwa karena ini motor nyata, maka motor tersebut menarik arus kecil sehingga menghasilkan beberapa torsi, bahkan ketika tidak diberi beban. Fakta bahwa motor ini memerlukan torsi, meskipun tidak ada torsi beban dan tidak ada akselerasi, disebabkan karena gesekan yang tak dapat dihindarkan dalam kipas pendingin, bearing dan gerigi sikat.

Jika ingin melakukan estimasi kecepatan tanpa beban pada tegangan jangkar yang berbeda (misal 250 V), maka abaikan arus tanpa beban yang kecil dan dengan menggunakan persamaan (3.2) memberikan

$$\text{kecepatan tanpa beban pada } 250 \text{ V} = (250/500) \times 1040 = 520 \text{ putaran/menit}$$

Karena persamaan (3.2) didasarkan pada asumsi bahwa arus tanpa beban adalah nol, maka hasil ini hanya merupakan estimasi.

Jika menginginkan hasil yang lebih presisi, maka langkah pertama adalah harus menghitung nilai asli GGL balik menggunakan persamaan (3.1) yang memberikan

$$E = 500 - (0.8 \times 1) = 449.2 \text{ V}$$

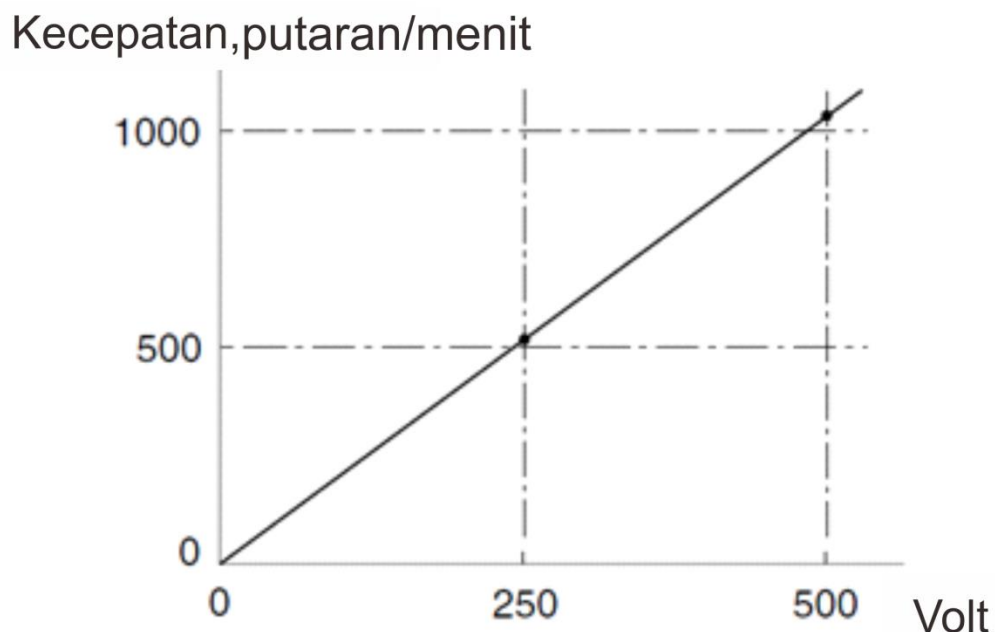
Sesuai ekspektasi bahwa GGL balik hampir sama dengan tegangan yang diberikan. Kecepatan yang sesuai adalah 1040 putaran/menit, jadi konstanta GGL harus $449.2/1040$ atau $480 \text{ V}/1000$ putaran/menit. Untuk menghitung kecepatan tanpa beban pada $V = 250 \text{ V}$, pertama harus diketahui arusnya. Pada kasus ini tidak diketahui variasi torsi gesekan terhadap kecepatan, sehingga yang dapat dilakukan adalah mengasumsikan bahwa torsi gesekan adalah konstan. Dalam hal ini arus tanpa beban adalah 0.8 A terlepas dari kecepatan. Dengan asumsi ini, GGL balik diberikan oleh

$$E = 250 - (0.8 \times 1) = 249.2 \text{ V}$$

Dan karenanya, kecepatan diberikan oleh

$$\text{kecepatan tanpa beban pada } 250 \text{ V} = \frac{249.2}{480} \times 1000 = 519.2 \text{ putaran/menit}$$

Perbedaan antara estimasi kecepatan tanpa beban dan hasil sebenarnya sangat kecil dan tidak signifikan. Sehingga dapat menggunakan persamaan (3.2) untuk memprediksi kecepatan tanpa beban pada tegangan jangkar apa pun dan mendapatkan set kecepatan tanpa beban yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Gambar 3.1 ini menunjukkan hubungan linier yang sangat sederhana antara kecepatan motor dc tanpa beban dan tegangan jangkar.

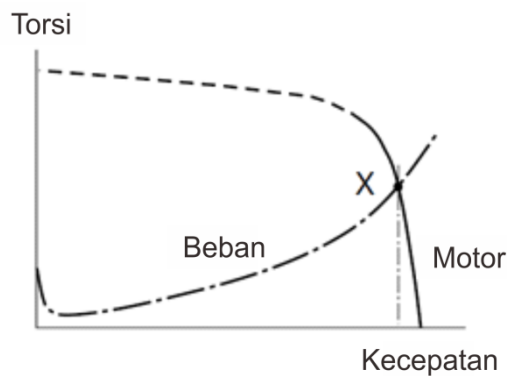


Gambar 3.1 Kecepatan motor dc tanpa beban sebagai fungsi dari tegangan jangkar.

3.3 Perilaku Ketika Diberi Beban

Setelah melihat bahwa kecepatan tanpa beban motor berbanding lurus dengan tegangan jangkar, selanjutnya perlu dieksplorasi bagaimana kecepatan akan berubah ketika beban pada poros (*shaft*) diubah.

Cara biasa yang digunakan untuk menghitung beban adalah dengan menentukan torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban pada kecepatan tertentu. Beberapa beban, seperti *lift drumtype* sederhana dengan berat konstan pada kait, memerlukan torsi yang sama tanpa memandang kecepatan. Tetapi untuk berat yang tidak konstan, maka dibutuhkan torsi dan kecepatan yang bervariasi. Misal pada kipas, torsi yang dibutuhkan bervariasi dengan kuadrat kecepatan. Jika diketahui karakteristik kecepatan/torsi beban, dan karakteristik kecepatan/torsi motor, maka dapat ditemukan kecepatan keadaan tunak hanya dengan menemukan persimpangan dua kurva pada bidang kecepatan-torsi. Contoh (motor dc tidak spesifik) ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Kurva kecepatan torsi keadaan tunak pada motor dan beban yang menunjukkan lokasi (*X*) dari kondisi operasi keadaan tunak.

Pada titik *X* torsi yang dihasilkan oleh motor sama persis dengan torsi yang dibutuhkan untuk menjaga agar beban tetap berputar, sehingga motor dan beban berada dalam kesetimbangan dan kecepatan tetap stabil. Pada kecepatan yang lebih rendah, torsi motor akan lebih tinggi dari torsi beban sehingga torsi murni akan positif, yang mengarah ke akselerasi motor. Saat kecepatan naik ke *X*, akselerasi berkurang hingga kecepatan stabil di *X*. Sebaliknya, pada kecepatan di atas *X*, torsi penggerak motor lebih kecil dari torsi pengereman yang diberikan oleh beban sehingga torsi murni negatif dan sistem akan melambat hingga mencapai kesetimbangan pada *X*. Kasus ini adalah salah satu contoh yang secara stabil inheren, sehingga jika kecepatan terganggu karena beberapa alasan dari titik *X*, maka akan selalu kembali ke *X* ketika gangguan dihilangkan.

Beralih ke derivasi karakteristik kecepatan/torsi motor dc, dapat menggunakan contoh sebelumnya untuk menggambarkan masalah. Diperoleh kecepatan beban penuh untuk $V = 500$ V dengan terlebih dahulu menghitung GGL balik pada beban penuh (misal arus 20 A). Dari persamaan (3.1) didapatkan

$$E = 500 - (20 \times 1) = 480 \text{ V}$$

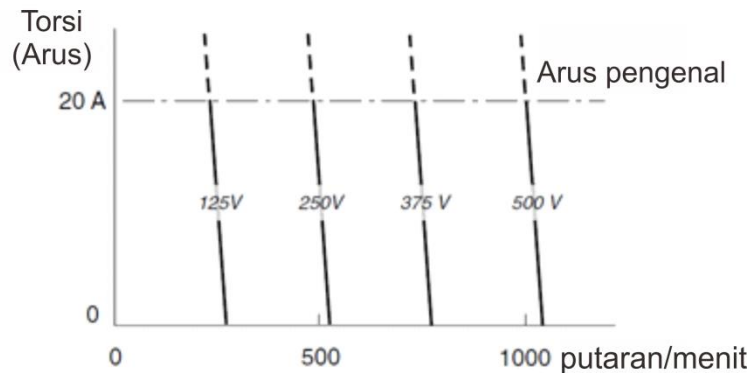
Telah ditetapkan sebelumnya bahwa GGL adalah 480 V/1000 putaran/menit, sehingga kecepatan beban penuh adalah 100 putaran/menit. Dari kondisi tanpa beban ke beban penuh, kecepatan turun secara linear dan memberikan kurva kecepatan torsi untuk $V = 500$ V yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Perhatikan bahwa dari kondisi tanpa beban ke beban penuh, kecepatan turun dari 1040 putaran/menit ke 1000 putaran/menit, penurunan hanya 4%. Pada kisaran yang sama, GGL balik turun dari hampir 500 V ke 480 V, yang tentu saja juga mewakili penurunan 4%.

Pada beban penuh, daya masukan listrik diberikan oleh VI , yaitu $500 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 10 \text{ kW}$. Kehilangan daya dalam resistansi jangkar adalah $I^2R = 400 \times 1 = 400 \text{ W}$. Daya yang dikonversi dari bentuk listrik ke bentuk mekanik diberikan oleh EI , yaitu $480 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 9600 \text{ W}$. Dapat dilihat dari data kondisi tanpa beban bahwa daya yang diperlukan untuk mengatasi gesekan dan rugi besi (*eddy current* dan histeresis, terutama di rotor) pada kondisi tanpa beban adalah sekitar $500 \text{ V} \times 0,8 \text{ A} = 400 \text{ W}$, sehingga menyisakan sekitar 9,2 kW. Daya keluaran terukur 9,1 kW menunjukkan bahwa 100 W kerugian tambahan dapat diharapkan dalam kondisi beban penuh.

Dari perhitungan tersebut didapat dua pengamatan penting. Yang pertama adalah penurunan kecepatan dengan beban yang sangat kecil. Hal ini dibutuhkan pada sebagian aplikasi, karena yang harus dilakukan untuk mempertahankan kecepatan yang hampir konstan adalah mengatur tegangan jangkar yang sesuai dan menjaganya tetap konstan. Kedua adalah keseimbangan halus antara V dan E . Arus sebenarnya proporsional dengan perbedaan antara V dan E (persamaan (3.1)), sehingga perubahan yang cukup kecil baik di V atau E menimbulkan perubahan besar yang tidak proporsional dalam arus. Dalam contoh diatas, pengurangan 4% pada E menyebabkan arus naik ke nilai pengenalnya. Oleh karena itu untuk menghindari arus berlebih (misal yang tidak dapat ditoleransi oleh thyristor yang tersedia), perbedaan antara V dan E harus dibatasi. Poin ini akan diambil kembali ketika mengeksplorasi kinerja sementara.

Representasi karakteristik torsi kecepatan untuk motor yang dibahas di atas ditunjukkan pada Gambar 3.3. Seperti yang sudah dijelaskan, kecepatan tanpa beban berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sedangkan kemiringan masing-masing kurva adalah sama yang ditentukan oleh resistansi jangkar. Semakin kecil resistansi semakin sedikit kecepatan yang

berkurang karena beban. Karakteristik operasi ini sangat menarik karena kecepatan dapat diatur hanya dengan menerapkan tegangan yang benar.



Gambar 3.3 Serangkaian kurva kecepatan torsi keadaan tunak pada rentang tegangan jangkar.

Daerah atas dari masing-masing karakteristik pada Gambar 3.3 ditunjukkan dengan garis putus-putus, karena di daerah ini arus jangkar berada di atas nilai pengenalnya. Oleh karena itu motor dapat mengalami panas berlebih (*overheat*) jika dioperasikan secara terus menerus pada daerah tersebut. Motor dapat beroperasi di atas arus pengenal untuk jangka waktu yang tidak lama. Fakta bahwa mesin dc dapat terus memberikan torsi secara proporsional dengan arus yang baik ke daerah beban lebih (*overload*), membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan dorongan torsi berlebih sesekali.

Pendinginan mungkin dibutuhkan ketika motor dijalankan terus menerus pada arus penuh (yaitu torsi penuh) bahkan pada kecepatan yang sangat rendah, di mana ventilasi alami buruk. Kondisi operasi ini dianggap cukup normal dalam sistem penggerak motor yang diumpankan konverter, dan motor yang sesuai dilengkapi dengan motor peniup (*blower*) udara kecil sebagai standar.

Motor dc secara inheren mampu beroperasi sebagai generator, mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Meskipun sebagian besar motor akan menghabiskan sebagian besar waktu kerja dalam mode motor, namun ada aplikasi seperti *rolling mills* di mana sering diperlukan sebagai pembalikan, dan aplikasi lain di mana diperlukan pengereman yang cepat. Dalam mode pembalik, motor dapat dikendalikan sehingga mengembalikan energi kinetik yang disimpan ke sistem pasokan setiap kali gulungan harus dibalik. Untuk pengereman, energi juga dapat dikembalikan ke catu, atau dibuang sebagai panas dalam resistor. Mode operasi sementara ini mungkin lebih baik digambarkan sebagai “regenerasi” karena hanya melibatkan pemulihan energi yang awalnya disediakan oleh motor.

Generasi berkelanjutan memungkinkan untuk menggunakan mesin dc asalkan memiliki sumber tenaga mekanik seperti pembakaran dalam/*internal combustion* (IC). Dalam contoh di atas, dapat dilihat bahwa ketika terhubung ke pasokan 500 V, mesin tanpa beban beroperasi pada 1040 putaran/menit di mana titik GGL balik mendekati 500 V dan hanya arus positif kecil mengalir. Saat menerapkan beban mekanis ke poros, kecepatan keadaan tunak berkurang. Dengan demikian mengurangi GGL balik dan meningkatkan arus jangkar sampai torsi motor sama dengan torsi beban dan keseimbangan tercapai. Dapat dilihat bahwa semakin kecil resistansi jangkar, maka semakin sedikit penurunan kecepatan dengan beban.

Sebaliknya, jika menerapkan torsi (beban) yang berlawanan, menggunakan mesin IC untuk memasok torsi ke arah yang berlawanan, yaitu mencoba meningkatkan kecepatan motor. Peningkatan kecepatan akan menyebabkan gerakan GGL lebih besar daripada tegangan catu (500 V). Ini berarti bahwa arus akan mengalir dari mesin dc ke catu, menghasilkan pembalikan aliran daya. Kondisi pembangkit yang stabil akan tercapai ketika torsi motor (arus) memiliki besar yang sama dan berlawanan dengan torsi yang disediakan oleh mesin IC. Misal contoh arus beban penuh adalah 20 A, jadi untuk menggerakkan arus ini melalui resistansi sendiri dan mengatasi tegangan catu, GGL harus diberikan oleh

$$E = IR + V = (20 \times 1) + 500 = 520 \text{ V}$$

Kecepatan yang sesuai dapat dihitung dengan mengacu pada GGL tanpa beban (499.2 V pada 1040 putaran/menit) di mana kecepatan pembangkitan stabil diberikan oleh

$$\frac{N_{gen}}{1040} = \frac{520}{499.2} \quad \text{yaitu} \quad N_{gen} = 1083 \text{ putaran/menit}$$

Pada plot kecepatan torsi (Gambar 3.3) kondisi ini terletak pada proyeksi ke bawah karakteristik 500 V pada arus 20 A. Dapat dicatat bahwa rentang operasi penuh, dari motor beban penuh hingga pembangkit beban penuh dicapai dengan hanya sedikit perubahan kecepatan dari 1000 menjadi 1083 putaran/menit.

Perlu ditekankan bahwa untuk membuat motor tanpa beban masuk ke mode generator, yang harus dilakukan adalah mulai memasok daya mekanis ke poros motor. Tidak ada perubahan fisik yang harus dilakukan pada motor untuk membuatnya menjadi generator.

Selanjutnya ekspresi analitik akan diturunkan pada kecepatan kondisi tunak sebagai fungsi dari dua variabel yang dapat dikendali, yaitu tegangan yang diberikan (V), dan torsi beban (T_L). Torsi motor sama dengan torsi beban dalam kondisi tunak arus jangkar konstan dan mengabaikan istilah induktansi jangkar dalam persamaan (2.6), dan karena tidak ada akselerasi.

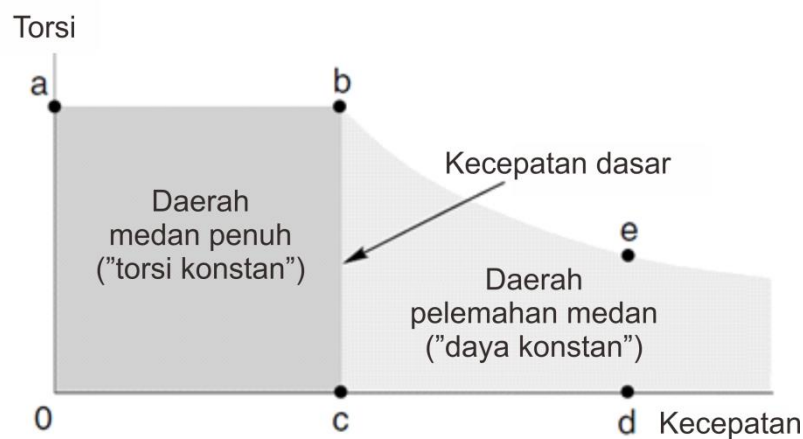
Oleh karena itu dengan menghilangkan arus I antara persamaan (2.4) dan (2.6), dan menggantikan E dari persamaan (2.5) kecepatan diberikan oleh

$$\omega = \frac{V}{k} - \frac{R}{k^2} T_L \quad (3.3)$$

Persamaan tersebut mewakili garis lurus dalam bidang kecepatan/torsi seperti yang terlihat pada contoh kerja sebelumnya. Suku pertama menunjukkan bahwa kecepatan tanpa beban berbanding lurus dengan tegangan jangkar, sedangkan suku kedua memberikan penurunan kecepatan untuk torsi beban tertentu. Gradien atau kemiringan kurva kecepatan torsi adalah $-R/k^2$, menunjukkan lagi bahwa semakin kecil resistansi jangkar, semakin kecil penurunan kecepatan ketika beban diberikan.

3.4 Kecepatan Dasar dan Pelemahan Medan

Perlu diingat bahwa pada karakteristik operasi motor, ketika aliran medan berada pada nilai penuh di kecepatan yang sesuai, maka tegangan jangkar dan arus bernilai penuh (yaitu kondisi beban terukur bernilai penuh) dikenal sebagai kecepatan dasar (*base speed*) seperti terlihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Daerah operasi kontinyu dalam bidang kecepatan-torsi (*speed-torque*).

Motor dapat beroperasi pada kecepatan berapapun hingga kecepatan dasar, dan pada torsi (arus) berapapun hingga nilai pengenal dengan pilihan tegangan jangkar yang sesuai. Daerah operasi aliran penuh ditunjukkan oleh daerah yang diarsir $0abc$ pada Gambar 3.4, dan sering disebut sebagai daerah torsi konstan (*constant torque*) pada bidang kecepatan-torsi. Dalam

konteks ini, torsi konstan menandakan bahwa pada kecepatan berapapun di bawah kecepatan dasar, motor mampu menghasilkan torsi terukur penuh. Istilah torsi konstan tidak berarti bahwa motor akan menghasilkan torsi konstan, namun menandakan bahwa motor dapat menghasilkan torsi konstan jika diperlukan. Misalkan seperti yang akan dibahas selanjutnya, yaitu beban mekanik yang diterapkan pada poros yang menentukan torsi keadaan tunak dihasilkan oleh motor.

Ketika arus berada pada nilai maksimum (misal sepanjang garis ab pada Gambar 3.4), maka torsi terukur berada pada nilai maksimumnya. Karena tenaga mekanik diberikan dari kecepatan dikali torsi, maka keluaran daya sepanjang ab sebanding dengan kecepatan, dan dengan demikian daya maksimum sesuai dengan titik b pada Gambar 3.4. Pada titik b , baik tegangan dan arus memiliki nilai pengenal penuh.

Untuk berjalan lebih cepat dari kecepatan dasar, aliran medan harus dikurangi seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (3.2). Operasi dengan aliran tereduksi dikenal sebagai pelemahan medan. Dengan membagi dua aliran (dan mempertahankan tegangan jangkar pada nilai penuh), kecepatan tanpa beban dilipat-gandakan (titik d pada Gambar 3.4). Namun peningkatan kecepatan diperoleh dengan mengorbankan torsi yang tersedia sebanding dengan arus aliran saat ini (persamaan (1.1)). Arus terbatas pada nilai pengenal, jadi jika aliran dibagi dua, maka kecepatan akan berlipat ganda tetapi torsi maksimum yang dapat dikembangkan hanya setengah dari nilai pengenal (titik e pada Gambar 3.4). Pada titik e , baik tegangan dan arus jangkar memiliki nilai pengenal penuh, sehingga daya bernilai maksimum seperti pada titik b . Dayanya konstan sepanjang kurva melalui b dan e , dan untuk alasan ini area yang diarsir di sebelah kanan garis bc disebut sebagai daerah daya konstan (*constant power*). Sehingga sangat jelas bahwa pelemahan medan hanya digunakan untuk aplikasi yang tidak membutuhkan torsi penuh pada kecepatan tinggi, seperti traksi listrik.

Kecepatan maksimum yang diperbolehkan dalam kondisi medan yang lemah harus dibatasi (untuk menghindari percikan yang berlebihan pada komutator), dan biasanya ditunjukkan pada *rating Plate* motor. Misal sebuah tanda 1200/1750 putaran/menit menunjukkan bahwa kecepatan dasar adalah 1200 putaran/menit dan kecepatan maksimum dengan pelemahan medan adalah 1750 putaran/menit. Kisaran pelemahan medan sangat bervariasi tergantung pada desain motor, namun kecepatan maksimum jarang melebihi tiga atau empat kali kecepatan dasar.

Singkatnya, kecepatan dikendali sebagai berikut:

- Dibawah kecepatan dasar, aliran bernilai maksimum dan kecepatan diatur oleh tegangan jangkar. Torsi penuh tersedia pada kecepatan berapapun.
- Diatas kecepatan dasar, tegangan jangkar berada pada (atau mendekati) maksimum dan aliran berkurang untuk menaikkan kecepatan torsi. Torsi maksimum yang tersedia berkurang sebanding dengan aliran.

Untuk menilai kesesuaian motor yang akan diterapkan pada aplikasi tertentu, perlu dilakukan perbandingan karakteristik kecepatan-torsi dari beban prospektif dengan diagram operasi motor. Jika torsi beban memerlukan pengoperasian di luar area yang diarsir pada Gambar 3.4, maka dibutuhkan motor yang lebih besar.

Perlu dikaji bahwa menurut persamaan (3.2), kecepatan tanpa beban akan menjadi tak terbatas jika aliran dikurangi menjadi nol. Tentu saja tidak mungkin, setelah dibahas sebelumnya bahwa medan berperan penting untuk operasi motor maka tidak mungkin jika melepas medan sepenuhnya untuk menaikkan kecepatan hingga tak terbatas. Faktanya, penjelasannya terletak pada asumsi bahwa “tanpa beban” bukan berarti motor memiliki torsi sebesar nol. Jika motor dibuat dengan tidak memiliki torsi gesek sedikitpun, kecepatannya memang akan terus meningkat ketika aliran medan dikurangi ke nilai nol. Namun ketika aliran dikurangi, torsi per ampere dari arus jangkar akan menjadi semakin kecil. Sehingga pada mesin nyata yang memiliki gesekan, akan datang suatu titik di mana torsi yang dihasilkan oleh motor sama dengan torsi gesek. Dan oleh karena itu, kecepatan akan dibatasi. Meskipun demikian, cukup berbahaya untuk membuka rangkaian lilitan medan, terutama pada motor besar tanpa beban. Mungkin ada cukup “sisa” magnet yang tersisa di kutub untuk menghasilkan torsi akselerasi yang signifikan untuk mengarah pada situasi *run-away*. Biasanya, medan dan rangkaian jangkar saling terkait sehingga jika medan tersebut hilang, sirkuit jangkar dimatikan secara otomatis.

3.5 Reaksi Jangkar

Selain pelemahan medan yang disengaja, aliran pada mesin dc juga dapat dilemahkan oleh efek yang dikenal sebagai “reaksi jangkar”. Seperti namanya, reaksi jangkar berkaitan dengan pengaruh yang dimiliki oleh MMF jangkar pada aliran mesin. Pada mesin kecil biasanya diabaikan, namun pada mesin besar pelemahan medan yang tidak diinginkan yang disebabkan oleh reaksi jangkar membutuhkan desain fitur yang ekstra untuk menanggulangnya.

Cara reaksi jangkar terjadi dapat dilihat pada Gambar 1.1 dengan catatan bahwa MMF dari konduktor jangkar bekerja di sepanjang sumbu yang ditentukan oleh sikat. Misal MMF jangkar

bertindak dalam *quadrature* ke sumbu aliran utama yang terletak di sepanjang kutub stator. Reluktansi dalam arah *quadrature* tinggi karena ruang udara besar yang harus dilalui aliran. Jadi terlepas dari kenyataan bahwa MMF rotor pada arus penuh bisa sangat besar, nilai aliran *quadrature* relatif kecil. Dan karena tegak lurus terhadap aliran utama, nilai rata-rata aliran yang terakhir tidak akan diharapkan dipengaruhi oleh aliran *quadrature*, meskipun bagian dari lintasan aliran reaksi dibagi dengan aliran utama ketika dilewati (secara horizontal di Gambar 1.1) melalui potongan kutub utama.

Aliran yang dihasilkan oleh konduktor itu sendiri tidak perlu diperhitungkan ketika menghitung gaya elektromagnetik di atasnya. Dan jika bukan karena fenomena nonlinier saturasi magnetik, aliran reaksi jangkar tidak akan berpengaruh pada nilai rata-rata aliran utama dalam mesin yang ditunjukkan Gambar 1.1. Kerapatan aliran pada satu sisi potongan kutub akan meningkat dengan adanya aliran reaksi, tetapi menurun dengan jumlah yang sama di sisi yang lain sehingga rata-rata aliran utama tidak berubah. Namun jika besi di sirkuit magnetik utama telah mencapai saturasi, kehadiran MMF rotor akan menyebabkan lebih sedikit peningkatan pada satu sisi daripada menyebabkan penurunan pada sisi lainnya, dan akan ada pengurangan bersih pada aliran utama.

Seperti yang telah diketahui bahwa mengurangi aliran maka akan meningkatkan kecepatan. Sehingga dapat dilihat bahwa dalam sebuah mesin yang nyata dengan reaksi jangkar, ketika beban pada poros meningkat dan arus jangkar meningkat untuk menghasilkan lebih banyak torsi, maka medan berkurang secara simultan dan motor semakin cepat. Meskipun perilaku ini bukan kasus ketidakstabilan yang sebenarnya dan umumnya tidak diinginkan.

Motor besar sering menggunakan belitan tambahan yang dipasang pada celah di permukaan kutub dan dihubungkan secara seri dengan jangkar. Belitan “kompensasi” ini menghasilkan MMF yang berlawanan dengan MMF jangkar, sehingga mengurangi atau menghilangkan efek reaksi jangkar.

3.6 Daya Keluaran Maksimum

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa jika beban mekanis pada poros meningkat, maka kecepatan turun dan arus jangkar secara otomatis meningkat sampai kesetimbangan torsi tercapai kemudian kecepatan kembali menjadi stabil. Jika tegangan jangkar berada pada nilai

maksimumnya (pengenal), dan kemudian beban mekanis ditingkatkan hingga arus mencapai nilai pengenalnya, maka jelas kondisi ini berada pada beban penuh, yaitu motor beroperasi pada kecepatan penuh (ditentukan oleh tegangan) dan torsi penuh (ditentukan oleh arus). Arus maksimum diatur pada tahap desain, dan mencerminkan tingkat pemanasan yang dapat ditoleransi dari konduktor jangkar.

Jelas jika ditambah beban pada poros lebih banyak lagi, maka arus akan melebihi nilai aman dan motor akan mulai terlalu panas. Tetapi pertanyaan adalah, jika bukan karena masalah panas berlebih, dapatkah motor menghasilkan daya yang lebih banyak, atau apakah ada batasannya?

Pada Gambar 3.3 dapat dilihat bahwa ada daya maksimum dengan melihat kurva kecepatan-torsi. Daya keluaran mekanis adalah hasil dari torsi dan kecepatan, dan daya akan menjadi nol ketika salah satu torsi beban bernilai nol (misal motor berjalan ringan) atau kecepataannya nol (misal motornya diam). Harus ada maksimum di antara kedua nol ini, dan daya mekanik puncak terjadi ketika kecepataannya setengah dari kecepatan tanpa beban. Namun, kondisi operasi ini hanya dapat dilakukan di motor yang sangat kecil. Di sebagian besar motor, catu tidak akan mampu menyediakan arus yang sangat tinggi yang diperlukan oleh motor.

Untuk menentukan daya maksimum secara teoritis, dapat diterapkan teorema transfer daya maksimum (dari teori rangkaian) ke rangkaian ekuivalen pada Gambar 2.1. Dengan mengasumsikan kondisi dc, maka induktansi dapat diabaikan. Jika resistansi jangkar R dianggap seolah-olah resistansi sumber V , maka teorema menunjukkan bahwa untuk mentransfer daya maksimum ke beban (diwakili oleh gerakan GGL di sisi kanan Gambar 2.1) harus membuat beban terlihat seperti resistansi yang sama dengan resistansi sumber, R . Kondisi ini diperoleh ketika tegangan yang diberikan V dibagi secara merata, sehingga setengahnya dijatuhkan di R dan setengah lainnya sama dengan GGL, E . Perhatikan bahwa kondisi $E = V/2$ sesuai dengan motor yang berjalan pada setengah kecepatan tanpa beban. Pada daya maksimum, arus adalah $V/2R$, dan daya keluaran mekanis (EI) diberikan oleh $V^2/4R$.

Ekspresi untuk daya keluaran maksimum sangat sederhana. Daya maksimum hanya ditentukan oleh tegangan dan resistansi jangkar. Sebagai contoh, motor 12 V dengan resistansi jangkar 1Ω tidak mungkin menghasilkan lebih dari 36 W daya keluaran mekanik. Harus diamati bahwa di bawah kondisi daya maksimum, efisiensi keseluruhan hanya 50% (karena daya yang sama dibakar sebagai panas dalam resistansi jangkar). Dan ditekankan lagi bahwa hanya motor yang sangat kecil yang dapat dioperasikan terus menerus dalam kondisi ini. Untuk sebagian besar motor digunakan hanya untuk kepentingan akademis, karena arus ($V/2R$) akan terlalu tinggi sebagai catu.

4. PERILAKU TRANSIEN-ARUS SENTAKAN

Telah dibahas sebelumnya bahwa arus jangkar keadaan tunak tergantung pada perbedaan kecil antara GGL balik E dan tegangan V yang diterapkan. Dalam perangkat kemudi yang diumpangkan konverter, sangat penting untuk menjaga arus dalam batas aman. Jika tidak, maka thyristor atau transistor (yang memiliki kapasitas arus lebih yang sangat terbatas) akan rusak. Kondisi ini mengikuti persamaan (3.1) bahwa untuk mencegah arus melebihi nilai pengenalnya, maka tidak boleh memberikan perbedaan V dan E lebih dari IR , di mana I adalah arus pengenal.

Cukup aneh jika mencoba menjalankan semua motor, kecuali motor dc kecil, untuk mencapai kecepatan hanya dengan menyalakan tegangan pengenal. Dalam contoh yang dipelajari sebelumnya, tegangan pengenal 500 V dan resistansi jangkar 1Ω . Pada saat berhenti, GGL balik bernilai nol, sehingga arus awal adalah $500/1 = 500$ A, atau 25 kali nilai arus pengenal. Kondisi ini tentu akan merusak thyristor di konverter catu (dan/atau memutus sekring). Maka jelas bahwa tegangan awal yang harus diberikan jauh lebih kecil dari 500 V. Dan jika ingin membatasi arus ke nilai arus pengenal (misal 20 A dalam contoh) tegangan yang dibutuhkan adalah 20×1 , yaitu hanya 20 V. Saat kecepatan bertambah, GGL balik akan naik, dan untuk mempertahankan arus penuh, V juga harus dinaikkan sehingga perbedaan antara V dan E tetap konstan pada 20 V. Tentu saja motor tidak akan berakselerasi dengan sangat cepat ketika arus dijaga. Namun hal ini adalah konsekuensi yang harus diberikan untuk melindungi konverter.

Kendala lonjakan arus yang serupa juga terjadi jika beban pada motor tiba-tiba meningkat, karena akan mengakibatkan motor melambat sehingga penurunan pada E . Penurunan pada E membawa kondisi peningkatan arus yang diperlukan untuk memasok beban tambahan. Namun tentu saja hanya naik ke nilai pengenalnya. Peningkatan arus diluar titik nilai pengenal maka harus siap untuk mengurangi V untuk mencegah arus berlebih.

Solusi untuk masalah arus lebih terletak pada penyediaan pembatas arus *loop* tertutup (*closed loop current-limiting*) sebagai fitur integral dari paket motor/drive. Arus motor dirasakan, dan tegangan V diatur secara otomatis sehingga arus terukur tidak mencapai nilai pengenal dua kali lipat selama beberapa detik.

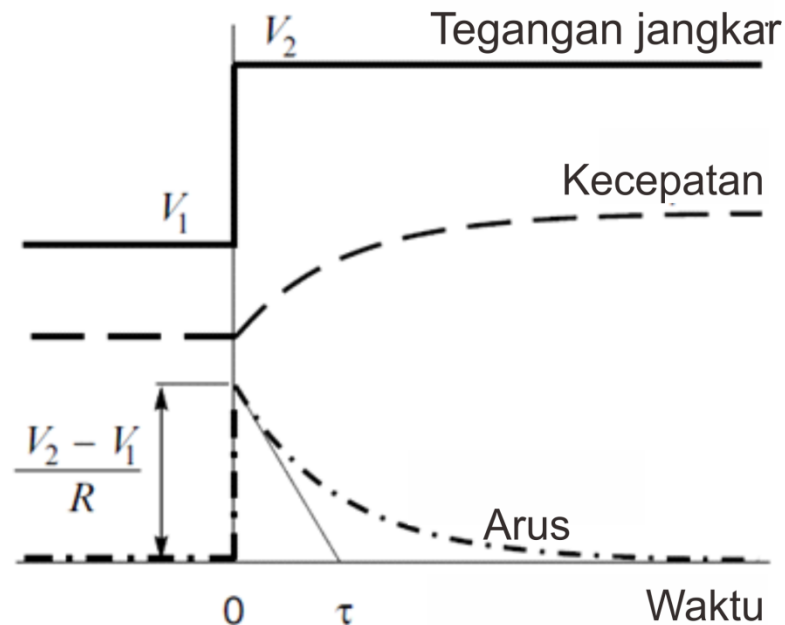
4.1 Perilaku Dinamis dan Konstanta Waktu

Penggunaan istilah “lonjakan” dan “tiba-tiba” dalam diskusi di atas akan memberikan kesan bahwa perubahan dalam arus atau kecepatan motor dapat terjadi secara instan. Sedangkan pada

kenyataannya, untuk melakukan perubahan pada keduanya selalu memerlukan waktu yang terbatas. Jika arus berubah, maka energi yang tersimpan dalam induktansi jangkar juga berubah. Dan jika kecepatan berubah, maka energi kinetik putar disimpan dalam inersia juga berubah. Pada salah satu dari perubahan ini terjadi dalam waktu nol, maka akan diperlukan pulsa daya yang tak terbatas, yang jelas mustahil.

Ketika motor berjalan, ada dua masukan yang dapat diubah secara tiba-tiba, yaitu tegangan yang diberikan dan torsi beban. Ketika salah satunya diubah, motor memasuki periode transien sebelum menetap ke kondisi keadaan tunak yang baru. Ternyata jika induktansi jangkar diabaikan (misal konstanta waktu jangkar nol), periode transien dicirikan oleh respons eksponensial orde pertama dalam kecepatan dan arus. Asumsi ini berlaku untuk semua motor, kecuali motor yang sangat besar. Hasil yang sama diperoleh ketika melihat motor linear kuno.

Sebagai contoh, jika tegangan jangkar motor tiba-tiba ditingkatkan tanpa gesekan dan tanpa beban dari V_1 ke V_2 , kecepatan dan arusnya akan bervariasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Respon motor dc untuk meningkatkan tegangan jangkar.

Ada peningkatan langsung dalam arus (induktansi telah diabaikan) mencerminkan bahwa tegangan yang diberikan tiba-tiba lebih dari GGL balik. Peningkatan arus menghasilkan torsi yang lebih banyak sehingga motor berakselerasi. Kecepatan naik disertai dengan peningkatan GGL balik, sehingga arus mulai turun. Proses berlanjut hingga kecepatan stabil baru tercapai sesuai

dengan tegangan baru. Dalam kasus khusus ini, arus keadaan tunak bernilai nol karena diasumsikan tidak ada gesekan atau torsi beban, tetapi bentuk respons dinamis akan sama jika ada beban awal, atau jika tiba-tiba merubah beban.

Arus sebagai fungsi waktu (t) diekspresikan sebagai

$$i = \left(\frac{V_2 - V_1}{R} \right) e^{-t/\tau} \quad (4.1)$$

Ekspresi untuk perubahan dalam kecepatan adalah serupa, ketergantungan waktu menampilkan istilah transien eksponensial $e^{-t/\tau}$. Signifikansi waktu-konstan (τ) ditunjukkan pada Gambar 4.1. Jika gradien awal grafik arus diproyeksikan, akan memotong nilai akhir setelah satu waktu-konstan. Secara teori, dibutuhkan waktu tak terbatas untuk menyelesaikannya, tetapi dalam praktiknya transien biasanya dianggap berakhir setelah sekitar empat atau lima konstanta waktu. Bisa dicatat bahwa respons transien sangat memuaskan, segera setelah tegangan dinaikkan, arus akan segera meningkat untuk memberikan lebih banyak torsi dan memulai akselerasi. Tetapi torsi akselerasi berkurang secara bertahap untuk memastikan bahwa kecepatan target baru didekati dengan lancar. Karena sistem ini merupakan orde pertama, tidak ada respons osilasi dengan *overshoot*.

Analisis menghasilkan hubungan antara konstanta waktu dan parameter motor/sistem sebagai

$$\tau = \frac{RJ}{k^2} \quad (4.2)$$

di mana R adalah resistansi jangkar, J adalah inersia putaran total motor plus beban, dan k adalah konstanta motor (persamaan 2.2 dan 2.3). Ketepatan istilah konstanta waktu elektromekanis harus jelas dari persamaan (4.2), karena τ bergantung pada parameter listrik (R dan k) dan parameter mekanik, J . Fakta bahwa jika inersia digandakan, waktu konstan akan berlipat ganda dan transien akan memakan waktu dua kali lebih lama, tetapi pengaruh parameter motor R dan k mungkin tidak begitu jelas.

Konstanta waktu elektrik atau jangkar didefinisikan dengan cara yang biasa untuk rangkaian seri L, R , misal

$$\tau_a = \frac{L}{R} \quad (4.3)$$

Jika rotor stasioner motor dc ditahan dan menerapkan tegangan step V ke jangkar, maka arus akan naik secara eksponensial ke nilai akhir V/R dengan konstanta waktu τ_a .

Jika tegangan dc murni selalu diterapkan ke motor, maka diharapkan τ_a sesingkat mungkin sehingga tidak ada penundaan dalam penumpukan arus ketika tegangan diubah. Tetapi mengingat bahwa sebagian besar motor diumpankan dengan bentuk gelombang tegangan yang tidak halus, maka ditemukan bahwa karena induktansi dan waktu yang terkait, bentuk gelombang arus (dan karenanya torsi) lebih halus dari bentuk gelombang tegangan. Jadi kehadiran induktansi jangkar yang tak terhindarkan ternyata (dalam banyak kasus) menjadi keuntungan.

Sejauh ini terlihat dua konstanta waktu seolah-olah tidak terkait dalam pengaruh yang mereka miliki terhadap arus. Selanjutnya akan dibahas mulai dengan konstanta waktu elektromekanis, dengan asumsi bahwa konstanta waktu jangkar adalah nol, dan melihat bahwa pengaruh dominan pada arus selama transien adalah gerak GGL. Kemudian memeriksa arus ketika rotor stasioner (sehingga gerak GGL adalah nol), dan melihat bahwa pertumbuhan atau peluruhan arus diatur oleh induktansi jangkar, dimanifestasikan melalui jangkar waktu konstan.

Pada kenyataannya, kedua konstanta waktu memengaruhi arus secara bersamaan, dan gambarannya lebih rumit karena sistem pada kenyataannya adalah orde kedua. Namun untuk sebagian besar motor dan sebagian besar tujuan, konstanta waktu jangkar jauh lebih pendek daripada konstanta waktu elektromekanis. Hal ini memungkinkan untuk memperkirakan perilaku dengan memisahkan transien elektrik yang relatif cepat di sirkuit jangkar dari transien elektromekanis yang jauh lebih lambat yang jelas bagi pengguna.

5. MOTOR SHUNT, SERI DAN COMPOUND

Sebelum pasokan tegangan variabel menjadi tersedia, sebagian besar motor dc diwajibkan untuk beroperasi dari pasokan dc tunggal, biasanya dari tegangan konstan. Oleh karena itu, rangkaian jangkar dan medan dirancang untuk koneksi paralel (*shunt*), atau seri. Karakteristik operasi mesin *shunt* dan seri sangat berbeda, dan karenanya masing-masing tipe cenderung memiliki kedudukan yang sesuai. Motor *shunt* dinilai bagus untuk aplikasi kecepatan konstan, sementara motor seri masih banyak digunakan untuk aplikasi traksi.

Faktanya adalah bahwa motor yang diumpankan ke konverter secara terpisah, bebas dari kendala apa pun antara medan dan jangkar, dapat melakukan segala sesuatu yang dapat dilakukan motor *shunt* atau seri, dan banyak lagi. Dan diragukan apakah motor *shunt* dan seri akan meluas jika catu tegangan variabel selalu ada. Motor *shunt* dan motor seri dapat merugikan dibandingkan dengan motor yang tereksitasi secara terpisah. Oleh karena itu, disarankan untuk melihat kelebihan dengan mempertimbangkan hal ini.

Karakteristik operasi motor *shunt*, seri dan *compound* (campuran keduanya) akan dijelaskan di bawah, tetapi pertama-tama harus jelas tentang perbedaan fisik. Pada tingkat fundamental jumlah ini sangat sedikit, tetapi dalam detail pengaturan belitan, mereka cukup luas.

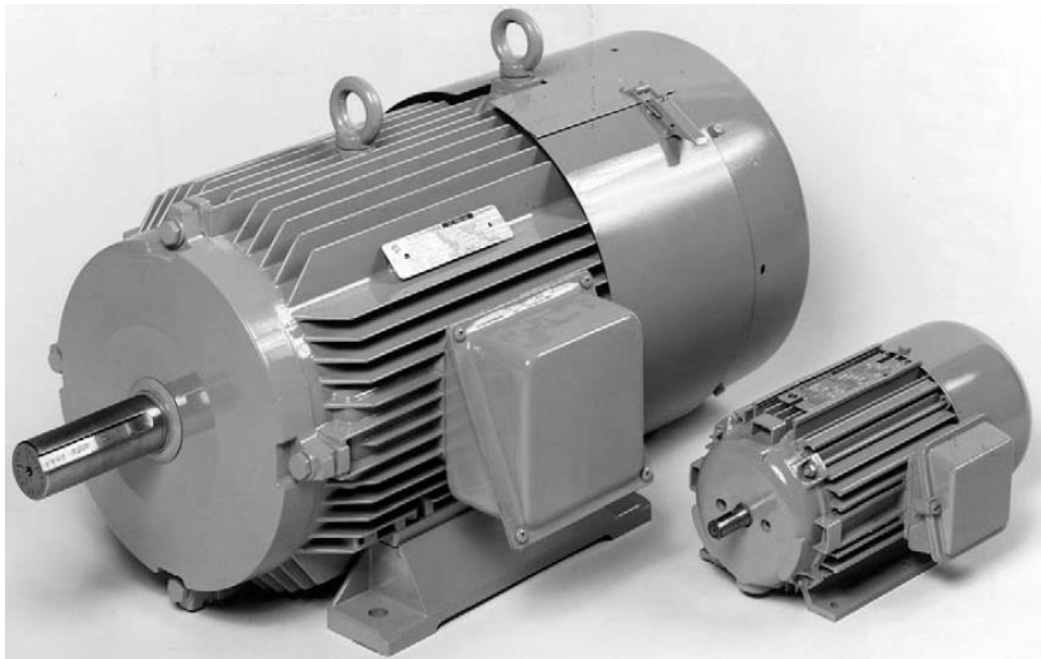


Plate 2 Motor dc totally-enclosed fan-ventilated wound-field. Motor yang kecil 500 W (0,67 hp) dengan 1500 putaran/menit, sedangkan yang lebih besar dinilai 10 kW (13,4 hp) dengan 2000 putaran/menit.

Untuk memberikan daya keluaran kontinu pada kecepatan tertentu, motor *shunt* dan seri memiliki ukuran yang sama, dengan diameter rotor yang sama, kutub yang sama dan jumlah tembaga yang sama dalam gulungan jangkar dan medan. Hal ini diharapkan ketika teringat bahwa keluaran daya tergantung pada muatan magnetik dan listrik tertentu, pengguna dapat mengantisipasi bahwa untuk melakukan pekerjaan yang diberikan, maka akan membutuhkan jumlah bahan aktif yang sama.

Perbedaan muncul ketika melihat rincian belitan, terutama sistem medan dan dapat diilustrasikan dengan cara contoh yang kontras motor *shunt* dan seri untuk daya keluaran yang sama. Misalkan untuk versi *shunt*, tegangan catu adalah 500 V, arus kerja jangkar pengenal adalah 50 A, dan kumparan medan diharuskan untuk memberikan MMF 500 *ampere-turns*/ampere-lilitan (AT). Medan biasanya terdiri dari 200 lilitan kawat dengan total resistansi 200 Ω . Saat terhubung melintasi catu (500 V), arus medan akan menjadi 2,5 A dan MMF akan menjadi 500 AT sesuai kebutuhan. Daya yang hilang karena panas di medan adalah $500 \text{ V} \times 2,5 \text{ A} = 1,25 \text{ kW}$, dan total daya masukan pada beban pengenal adalah $500 \text{ V} \times 52,5 \text{ A} = 26,25 \text{ kW}$.

Untuk mengubah mesin menjadi versi seri yang setara, kumparan medan harus dibuat dari konduktor yang jauh lebih tebal karena harus membawa arus jangkar 50 A dari motor *shunt*. Bekerja pada kerapatan arus yang sama, penampang setiap lilitan bidang seri harus 20 kali dari kabel bidang *shunt*. Tetapi sebaliknya hanya satu per dua puluh lilitan (yaitu 10) yang diperlukan untuk hal yang sama ampere-lilitan. Resistansi dari kawat dengan panjang l dan luas penampang A , terbuat dari bahan resistivitas ρ diberikan oleh $R = \rho l/A$, jadi dapat menggunakan rumus ini dua kali untuk menunjukkan bahwa ketahanan gulungan medan baru akan jauh lebih rendah, pada 0.5 Ω .

Sekarang dapat dihitung daya yang dibuang sebagai panas di bidang seri. Arus 50 A, resistansi 0,5 Ω , sehingga penurunan tegangan melintasi bidang seri adalah 25 V, dan daya terbuang karena panas 1,25 kW. Hal ini sama dengan untuk mesin *shunt*, karena kedua set gulungan medan dimaksudkan untuk melakukan pekerjaan yang sama.

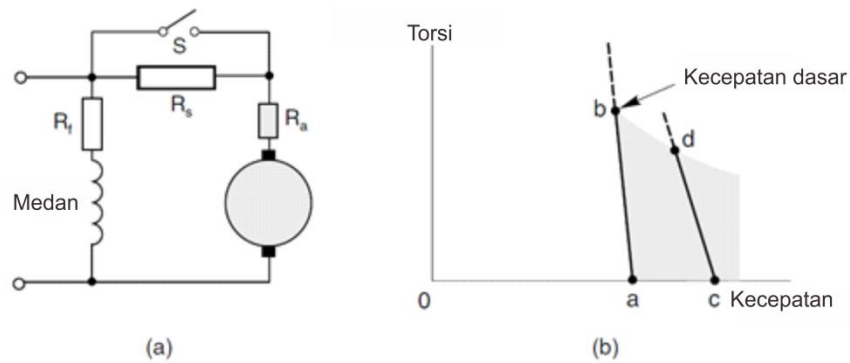
Untuk memungkinkan 25 V turun melintasi bidang seri, dan masih memenuhi persyaratan untuk 500 V di jangkar, maka tegangan catu sekarang harus 525 V. Arus pengenal adalah 50 A, sehingga total masukan daya adalah $525 \text{ V} \times 50 \text{ A} = 26,25 \text{ kW}$, sama seperti untuk mesin *shunt*.

Contoh ini menggambarkan bahwa dalam hal kemampuan konversi energi, motor *shunt* dan seri pada dasarnya tidak berbeda. Mesin *shunt* biasanya memiliki belitan medan dengan sejumlah besar lilitan kawat halus, sedangkan mesin seri memiliki beberapa lilitan konduktor tebal. Tetapi jumlah total dan letak tembaga sama, sehingga kemampuan konversi energi dari kedua jenis

tersebut identik. Namun, dalam hal karakteristik operasinya, kedua jenis ini sangat berbeda, seperti yang akan dijelaskan.

5.1 Motor *Shunt*- Karakteristik Operasi Kondisi Keadaan tunak

Motor terhubung *shunt* dasar memiliki jangkar dan medan paralel melintasi catu daya dc tunggal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1(a). Biasanya tegangan akan konstan dan pada nilai pengenalan untuk motor, dalam hal ini kurva kecepatan/torsi tetap akan sama dengan motor yang tereksitasi secara terpisah pada aliran medan terukur, yaitu kecepatan akan turun sedikit dengan beban, seperti yang ditunjukkan oleh baris *ab* pada Gambar 5.1(b). Di atas daerah operasi normal, karakteristik kecepatan torsi mirip dengan motor induksi, sehingga motor *shunt* cocok untuk kerja yang sama, misal aplikasi kecepatan konstan.



Gambar 5.1 Motor dc yang terhubung *shunt* dan kurva kecepatan-torsi keadaan tunak.

Kecuali untuk motor kecil (kurang dari sekitar 1 kW), akan perlu untuk memberikan “resistansi *starting (starting resistance)*” eksternal (R_s dalam Gambar 5.1) secara seri dengan jangkar, untuk membatasi arus deras yang akan mengalir jika motor hanya beralih langsung ke catu. Resistansi awal ini semakin berkurang saat motor mengambil kecepatan, arus turun saat GGL balik naik dari nilai awalnya nol. Pada starter manual resistansi dikendali oleh operator, sedangkan pada starter otomatis tegangan atau arus jangkar motorik diukur dan resistansi dihubung singkat pada tahap yang telah ditentukan.

Hal yang sering ditanyakan adalah apa yang terjadi jika tegangan catu diubah-ubah dengan suatu alasan. Hal yang paling mudah dilihat adalah pada kondisi motor berjalan ringan, dimana GGL balik hampir sama dengan tegangan catu. Jika tegangan catu dikurangi, mungkin terfikirkan

untuk mengantisipasi penurunan kecepatan. Namun pada kenyataannya, dua efek yang berlawanan terjadi dan membuat kecepatan hampir tidak berubah.

Jika tegangan dibagi dua, misalnya baik arus medan dan tegangan jangkar dibagi dua, dan jika rangkaian magnetik tidak saturasi, maka aliran juga berkurang menjadi setengah. Nilai stabil GGL balik baru harus bernilai setengah dari nilai aslinya. Tetapi karena hanya setengah aliran yang dimiliki, maka kecepatannya akan sama. Daya keluaran maksimum tentu berkurang karena pada beban penuh (misal arus penuh) daya yang tersedia sebanding dengan tegangan jangkar. Tentu saja jika rangkaian magnetik saturasi, sedikit penurunan tegangan yang diberikan dapat menyebabkan sedikit penurunan aliran. Sehingga kecepatan akan turun sebanding dengan penurunan tegangan. Dapat dilihat dari pembahasan ini secara umum mengapa motor *shunt* tidak cocok untuk operasi di bawah kecepatan dasar.

Beberapa pengukuran kendali kecepatan dimungkinkan dengan melemahkan medan (menggunakan tahanan (R_f) secara seri dengan medan belitan), dan memungkinkan kecepatan dinaikkan di atas nilai dasar hanya dengan mengorbankan torsi. Tipikal karakteristik kecepatan-torsi di daerah medan melemah ditunjukkan oleh garis *cd* pada Gambar 5.1(b). Rotasi balik dicapai dengan membalik koneksi ke medan atau jangkar. Medan ini biasanya lebih disukai karena nilai arus saklar atau kontaktor lebih rendah daripada untuk jangkar.

5.2 Motor Seri- Karakteristik Operasi Kondisi Keadaan Tunak

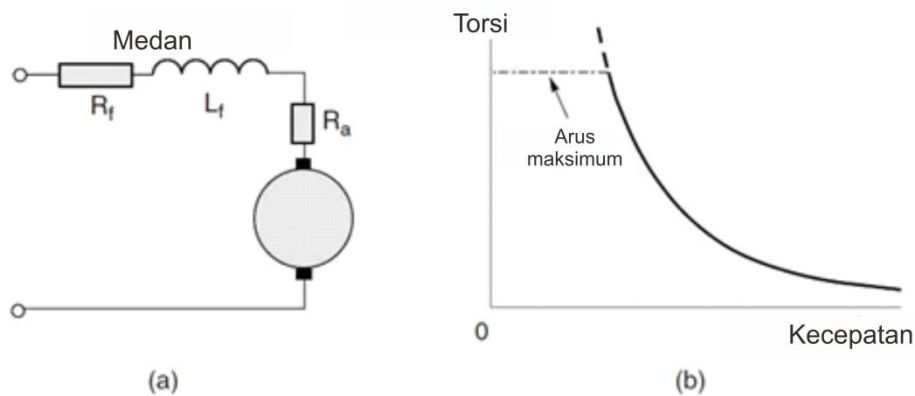
Koneksi jangkar dan belitan medan secara seri (Gambar 5.2(a)) menunjukkan bahwa aliran medan berbanding lurus dengan arus jangkar. Oleh sebab itu, sebanding dengan kuadrat arus. Membalikkan arah tegangan yang diberikan (dan arus) tidak akan mengubah arah torsi. Fitur yang tidak biasa ini dimanfaatkan dengan baik pada motor universal, namun merupakan suatu kekurangan ketika dibutuhkan torsi negatif (pengereman), karena koneksi medan atau jangkar harus dibalik.

Jika penurunan tegangan jangkar dan resistansi medan diabaikan, dan tegangan (V) yang diberikan konstan, arus berubah berbanding terbalik dengan kecepatan, maka torsi (T) dan kecepatan (n) dihubungkan oleh

$$T_{\infty} \left(\frac{V}{n} \right)^2 \quad (5.1)$$

Karakteristik tipikal kecepatan torsi ditunjukkan pada Gambar 5.2(b). Torsi pada kecepatan nol tentu saja tidak terbatas karena efek saturasi dan resistansi, keduanya diabaikan dalam persamaan (5.1).

Penting untuk dicatat bahwa dalam kondisi normal, hanya sebagian kecil penurunan tegangan dari tegangan yang diberikan ketika melintasi medan seri. Sebagian besar tegangan melintasi jangkar, berlawanan dengan GGL balik. Tentu saja inilah yang dibutuhkan untuk memperoleh konversi energi yang efisien. Pada kondisi *starting*, GGL balik adalah nol. Jika tegangan penuh diterapkan arus akan berlebihan, dibatasi hanya oleh resistensi jangkar dan medan. Oleh karena itu untuk semua motor, kecuali motor kecil, diperlukan resistansi awal untuk membatasi arus ke nilai yang aman.



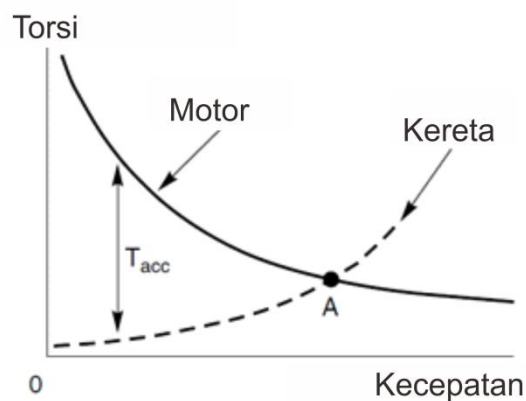
Gambar 5.2 Motor dc yang terhubung seri dan kurva kecepatan-torsi kondisi keadaan tunak.

Pada Gambar 5.2(b), dapat dicatat bahwa motor seri berbeda dari kebanyakan motor lain karena tidak memiliki kecepatan tanpa beban yang jelas, yaitu tidak ada kecepatan (selain tak terhingga) di mana torsi yang dihasilkan oleh motor turun ke nol. Hal ini berarti bahwa ketika berjalan dengan kecepatan tinggi, kecepatan motor tergantung pada torsi resistansi udara dan gesekan. Keseimbangan tercapai ketika torsi motor sama dengan torsi penahan mekanis total. Pada motor besar, torsi resistansi udara dan gesekan relatif kecil, dan kecepatan tanpa beban terlalu tinggi untuk keamanan mekanis. Oleh karena itu motor seri besar tidak boleh dijalankan tanpa terputus dari bebannya. Seperti halnya motor *shunt*, koneksi ke medan atau jangkar harus dibalik untuk membalikkan arah rotasi.

Motor seri besar secara tradisional telah digunakan untuk traksi. Seringkali pada buku-buku mengatakan bahwa karena motor seri memiliki torsi awal yang tinggi yang diperlukan untuk memberikan akselerasi pada kendaraan dari keadaan diam. Bahkan setiap motor dc dengan ukuran *frame* yang sama akan memberikan torsi awal yang sama, tidak ada yang istimewa dengan

motor seri dalam hal ini. Alasan sebenarnya untuk penggunaannya yang luas adalah bahwa di bawah pengaturan pasokan sesederhana mungkin yaitu tegangan konstan. Bentuk keseluruhan dari kurva kecepatan-torsi cocok dengan apa yang diperlukan dalam aplikasi traksi. Hal ini sangat penting ketika kendali tegangan jangkar tidak layak diberikan.

Kesesuaian yang melekat pada motor seri untuk traksi diilustrasikan oleh kurva Gambar 5.3, yang berhubungan dengan aplikasi kereta api. Garis yang tidak putus-putus mewakili karakteristik motor, sedangkan garis putus-putus adalah kurva kecepatan-torsi kondisi keadaan tunak untuk kereta, yaitu torsi yang harus disediakan motor untuk mengatasi resistansi yang bergelombang dan menjaga kereta berjalan pada setiap kecepatan.



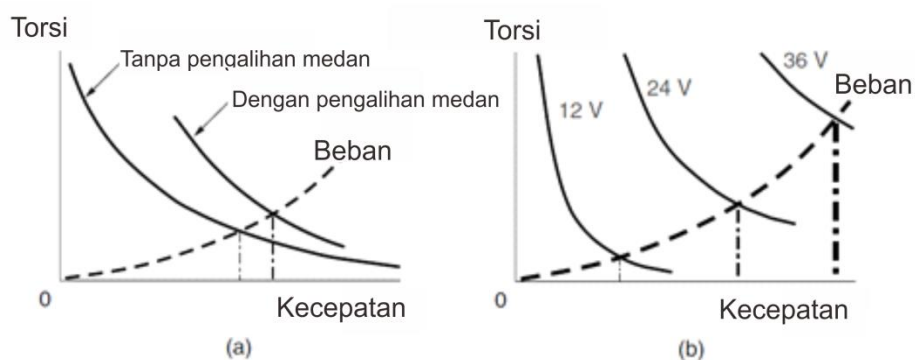
Gambar 5.3 Kurva kecepatan-torsi menggambarkan penerapan motor dc seri untuk traksi.

Pada kecepatan rendah, gelombang resistansi rendah, torsi motor jauh lebih tinggi, dan karenanya torsi bersih (T_{acc}) besar sehingga kereta berakselerasi dengan kecepatan tinggi. Saat kecepatan naik, torsi bersih berkurang dan akselerasi berkurang hingga kecepatan stabil tercapai pada titik A pada Gambar 5.3.

Beberapa bentuk kendali kecepatan jelas diperlukan dalam contoh di atas jika kecepatan kereta tidak berubah ketika bertemu gradien, yang akan mengakibatkan kurva gelombang resistansi bergeser ke atas atau ke bawah. Pada dasarnya ada tiga metode yang dapat digunakan untuk memvariasikan karakteristik kecepatan-torsi dan dapat dikombinasikan dengan berbagai cara.

Pertama, resistor dapat ditempatkan secara paralel dengan medan atau jangkar, sehingga sebagian kecil dari arus melewati satu atau yang lainnya. Resistor “pengalihan (*divert*)” medan biasanya lebih diminati karena rating dayanya lebih rendah daripada resistor pengalihan jangkar. Sebagai contoh, jika sebuah resistor dengan resistansi yang sama dengan gulungan medan

diaktifkan secara paralel, maka setengah dari arus jangkar akan mengalir melalui resistor dan setengah akan mengalir melalui medan. Pada kecepatan dan tegangan yang diberikan, arus jangkar akan meningkat secara substansial, sehingga aliran tidak akan turun sebanyak yang diharapkan, dan torsi akan naik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4(a). Metode ini tidak efisien karena daya terbuang dalam resistor, tetapi sederhana dan murah untuk diterapkan. Metode yang lebih efisien adalah dengan menyediakan “sadapan (*tapping*)” pada belitan medan, yang memungkinkan jumlah lilitan menjadi bervariasi. Tetapi tentu saja ini hanya dapat dilakukan jika motor memiliki sadapan yang dibawa keluar.



Gambar 5.4 Karakteristik motor seri dengan (a) kendali pengalihan medan dan (b) kendali tegangan.

Kedua, jika baterai multisel digunakan untuk mencatu motor, sel-sel dapat beralih secara bertahap dari paralel ke seri untuk memberikan berbagai langkah diskrit dari tegangan motor, dan kurva kecepatan-torsi seri. Kendaraan dengan baterai *lead-acid* 12 V sering menggunakan pendekatan ini untuk memberikan 12 V, 24 V, dan 36 V untuk motor, sehingga memberikan tiga pengaturan “kecepatan” diskrit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4(b).

Terakhir, di mana beberapa motor digunakan (misal dalam kereta api multi-unit) dan tegangan catu tetap, motor tersebut dapat diaktifkan dalam berbagai pengelompokan seri/paralel untuk memvariasikan tegangan yang diterapkan ke masing-masing.

5.3 Motor Universal

Dalam hal jumlah, area aplikasi utama untuk motor komutator seri adalah alat-alat listrik portabel, pencampur makanan, penyedot debu, dll, di mana secara paradoks menggunakan catu ac daripada dc. Motor seperti itu sering disebut sebagai motor “universal” karena dapat berjalan dari catu dc atau ac.

Fakta bahwa mesin dc akan bekerja pada ac sulit dipercaya. Tetapi jika ingat bahwa pada motor seri, aliran medan diatur oleh arus yang juga mengalir di jangkar. Dapat dilihat bahwa pembalikan arus akan disertai dengan pembalikan arah aliran magnet, dengan demikian torsi tetap positif. Misal ketika motor terhubung ke catu 50 Hz, arus (sinusoidal) akan berubah arah setiap 10 milin detik, dan akan ada puncak torsi 100 kali per detik. Tetapi torsi akan selalu tetap searah, dan fluktuasi kecepatan tidak akan terlihat karena efek penghalus dari inersia jangkar.

Motor seri yang digunakan pada catu ac selalu dirancang dengan konstruksi berlapis penuh (*fully laminated*) untuk membatasi kerugian *eddy current* yang dihasilkan oleh pulsa aliran dalam putaran/menit pada tegangan pengenalan. Komutasi dan percikan lebih buruk daripada saat beroperasi dari dc, dan daya keluaran jarang lebih besar dari 1 kW. Dan motor universal mungkin adalah contoh terbaik yang menunjukkan bagaimana daya tinggi dapat diperoleh dengan desain ukuran kecil dan untuk kecepatan tinggi.

Hingga baru-baru, ini motor universal menawarkan satu-satunya cara yang relatif murah untuk mendapatkan manfaat dari kecepatan tinggi dari pasokan ac fasa tunggal. Mesin ac kecil lainnya, seperti motor induksi dan motor sinkron, dibatasi pada kecepatan maksimum 3000 putaran/menit pada 50 Hz (atau 3600 putaran/menit pada 60 Hz), dan karenanya tidak dapat bersaing dalam hal daya per volume unit. Ketersediaan inverter frekuensi tinggi membuka prospek keluaran spesifik yang lebih tinggi dari motor induksi. Tetapi saat ini motor universal tetap menjadi kekuatan dominan dalam aplikasi kecil berbiaya rendah, karena investasi besar yang telah dibuat selama bertahun-tahun untuk menghasilkannya dalam jumlah besar.

Kendali kecepatan motor universal kecil secara langsung menggunakan triac (pada dasarnya sepasang thyristor terhubung *back-to-back*) secara seri dengan catu ac. Dengan memvariasikan sudut penyalan, dan karenanya proporsi setiap siklus yang melakukan triac, tegangan yang diterapkan pada motor dapat bervariasi untuk memberikan kendali kecepatan. Pendekatan ini banyak digunakan untuk bor listrik, kipas, dll. Jika kendali torsi diperlukan (seperti pada peralatan listrik tangan), arus dikendalikan dan kecepatan ditentukan oleh beban.

5.4 Motor *Compound*

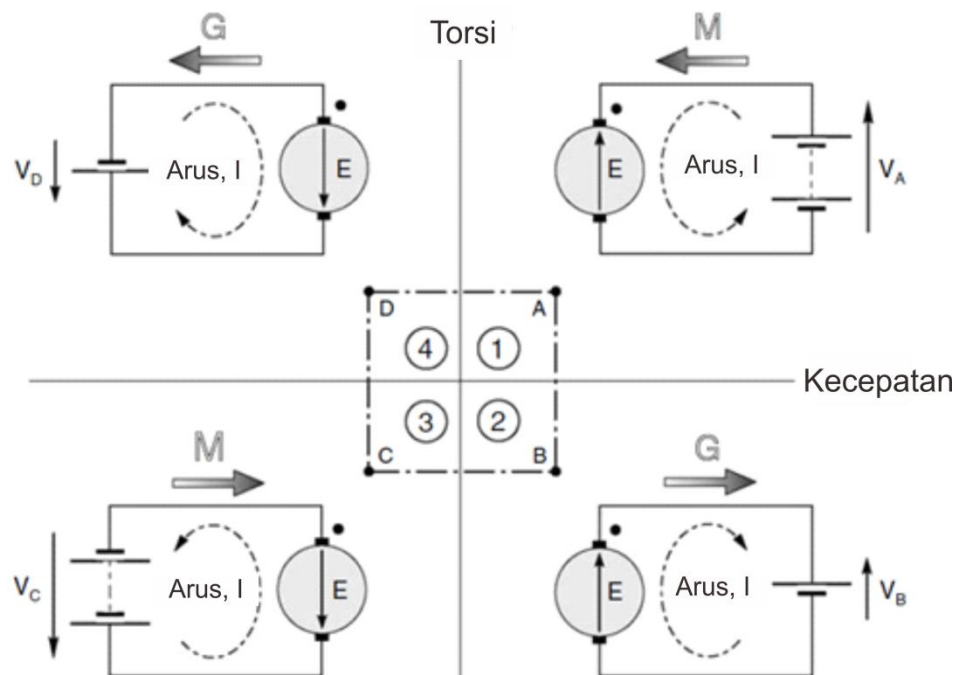
Dengan mengatur agar beberapa MMF medan disediakan oleh belitan seri dan beberapa lainnya disediakan oleh belitan *shunt*, maka dimungkinkan untuk mendapatkan motor dengan berbagai karakteristik kecepatan torsi. Dalam praktiknya, sebagian besar motor *compound* memiliki sebagian besar MMF medan yang disediakan oleh belitan medan *shunt*, sehingga motor tersebut berperilaku seperti motor yang terkoneksi *shunt*. MMF belitan seri relatif kecil dan

digunakan untuk memungkinkan kurva kecepatan torsi dipangkas untuk memenuhi persyaratan beban tertentu.

Ketika medan seri terhubung sehingga MMFnya memperkuat MMF medan *shunt*, maka motor dikatakan "*cumulatively compounded*". Ketika beban pada motor meningkat, peningkatan arus jangkar di medan seri menyebabkan aliran naik, sehingga meningkatkan torsi per ampere. Tetapi pada saat yang sama, menghasilkan penurunan kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan motor *shunt* sederhana. Di sisi lain, jika belitan medan seri berlawanan dengan belitan *shunt*, motor dikatakan "*differentially compounded*". Dalam hal ini hasil arus meningkat dalam melemahnya aliran, torsi per ampere berkurang, tetapi penurunan kecepatan lebih kecil daripada motor *shunt*. Oleh karena itu, *differential compounding* dapat digunakan untuk mempertahankan kecepatan sedekat mungkin.

6. PENGOPERASIAN EMPAT-KUADRAN DAN PENEREMAN REGENERATIF

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, keuntungan motor dc terpisah adalah mudah untuk dapat dikendali. Pertama, kecepatan keadaan tunak ditentukan oleh tegangan yang diberikan. Sehingga pengguna dapat membuat motor berjalan pada kecepatan yang diinginkan di kedua arah hanya dengan menerapkan besaran dan polaritas yang sesuai dari tegangan jangkar. Kedua, torsi berbanding lurus dengan arus jangkar, yang pada gilirannya tergantung pada perbedaan antara tegangan V yang diterapkan dan GGL balik E . Oleh karena itu, dapat dibuat mesin mengembangkan torsi positif (motor) atau negatif (pembangkit) sederhana dengan mengontrol nilai tegangan yang diberikan lebih besar atau lebih kecil dari GGL balik. Karenanya, mesin dc yang dikendali tegangan jangkar pada dasarnya mampu melakukan apa yang dikenal sebagai operasi “empat kuadran”, dengan mengacu pada jumlah kuadran dari bidang kecepatan-torsi yang ditunjukkan pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1 Pengoperasian motor dc di empat kuadran dari bidang kecepatan-torsi.

Gambar 6.1 perlu diuraikan poin-poin utama secara rinci. Pemahaman yang tepat dari diagram ini sangat berguna sebagai bantuan untuk melihat bagaimana perangkat kemudi kendali kecepatan beroperasi. Pertama, salah satu terminal motor ditunjukkan dengan titik pada bagian atas di keempat kuadran. Tujuan ketentuan ini adalah untuk menunjukkan tanda torsi. Jika arus

mengalir ke titik, mesin menghasilkan torsi positif, dan jika arus mengalir keluar dari titik, maka torsi negatif.

Kedua, tegangan catu ditunjukkan oleh simbol lama baterai. Karena penggunaan simbol yang baru berupa lingkaran sebagai sumber tegangan akan membuatnya sulit untuk membedakan antara lingkaran sumber dan lingkaran yang mewakili jangkar mesin. Besaran relatif dari tegangan yang diberikan dan gerakan GGL ditekankan oleh penggunaan dua sel baterai ketika $V > E$ dan satu ketika $V < E$.

Seperti yang telah diketahui bahwa dalam mesin dc, kecepatan ditentukan oleh tegangan yang diberikan dan torsi ditentukan oleh arus. Oleh karena itu di sisi kanan diagram, tegangan catu positif (ke atas), sedangkan di sisi kiri tegangan catu negatif (ke bawah). Dan di bagian atas arus diagram positif (ke titik), sedangkan di bagian bawah itu negatif (keluar dari titik). Demi kemudahan, masing-masing dari empat kondisi operasi (A, B, C, D) memiliki besaran kecepatan yang sama dan besarnya torsi yang sama. Hal ini menegaskan untuk menyamakan besarnya gerak GGL dan arus untuk setiap kondisi.

Ketika mesin beroperasi sebagai motor dan berjalan ke arah depan, maka beroperasi di kuadran 1. Tegangan yang diberikan V_A positif dan lebih besar dari GGL balik E , serta arus positif, maka mengalir ke motor. Pada Gambar 6.1, tanda panah mewakili V_A sehingga digambar lebih besar daripada E . Daya yang ditarik dari catu ($V_A I$) positif di kuadran ini, seperti yang ditunjukkan oleh panah berarsir berlabel M untuk mewakili motor. Daya yang dikonversi ke bentuk mekanik diberikan oleh $E I$, dan sejumlah $I^2 R$ hilang sebagai panas di jangkar. Jika E jauh lebih besar dari IR (yang berlaku di semua motor, kecuali motor kecil), sebagian besar daya masukan dikonversi menjadi daya mekanik, yaitu proses konversi efisien.

Jika ketika motor berjalan pada posisi A, kemudian tiba-tiba tegangan catu ke nilai V_B dikurangi dengan nilai yang kurang dari GGL balik, arus (dan torsi) akan membalikkan arah, menggeser titik operasi ke B pada Gambar 6.1. Tidak ada perubahan kecepatan yang terjadi secara tiba-tiba, sehingga GGL akan tetap sama. Jika tegangan baru dipilih sehingga $E - V_B = V_A - E$, maka arus baru akan memiliki amplitudo yang sama seperti pada posisi A. Sehingga torsi (negatif) yang baru akan sama dengan torsi positif asli, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1. Tapi sekarang daya dicatu dari mesin ke baterai, yaitu mesin bertindak sebagai generator, seperti yang ditunjukkan oleh panah berarsir.

Harus jelas bahwa semua yang diperlukan untuk mencapai pembalikan aliran daya yang ini adalah pengurangan sederhana dari tegangan yang diterapkan pada mesin. Pada posisi A,

tegangan yang diberikan adalah $E + IR$, sedangkan pada posisi B adalah $E - IR$. Karena IR akan kecil dibandingkan dengan E , perubahan ($2IR$) juga kecil.

Tidak dapat dikatakan bahwa motor tidak akan tetap pada titik B jika dibiarkan pada perangkatnya sendiri. Efek gabungan dari torsi beban dan torsi mesin negatif akan menyebabkan kecepatan turun, sehingga GGL balik jatuh di bawah tegangan yang diterapkan V_B . Arus dan torsi menjadi positif lagi dan motor menetap kembali ke kuadran 1 pada kecepatan yang lebih rendah sesuai dengan tegangan catu baru (lebih rendah). Selama fasa perlambatan, energi kinetik dari motor dan inersia beban dikembalikan ke catu. Karena itu, kondisi ini adalah contoh pengereman regeneratif, dan terjadi secara alami setiap kali kita mengurangi tegangan untuk menurunkan kecepatan.

Jika ingin beroperasi terus menerus pada posisi B , mesin harus digerakkan oleh sumber mekanis. Telah terlihat di atas bahwa kecenderungan alami mesin adalah berjalan pada kecepatan yang lebih rendah daripada yang sesuai dengan titik B . Jadi harus dipaksa untuk berjalan lebih cepat, dan membuat GGL lebih besar dari V_B , jika ingin membangkitkan terus menerus.

Seharusnya jelas bahwa argumen yang serupa berlaku ketika motor berjalan secara terbalik (misal V negatif). Motor kemudian terjadi di kuadran 3 (titik C), dengan masuk secara singkat ke kuadran 4 (titik D , disertai dengan pengereman regeneratif), setiap kali tegangan dikurangi untuk menurunkan kecepatan.

6.1 Pembalikan Regeneratif Kecepatan Penuh

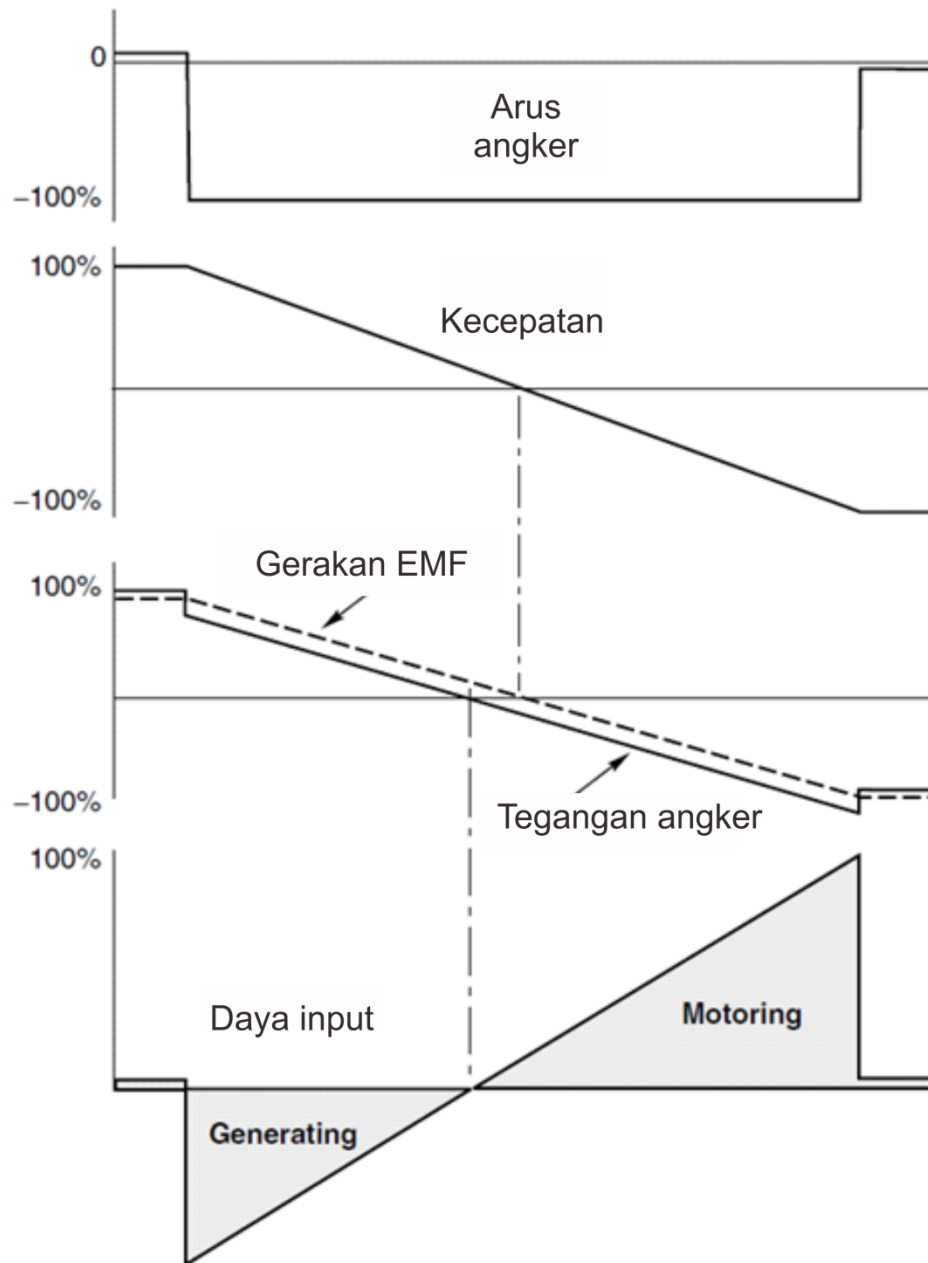
Untuk menggambarkan lebih lengkap bagaimana tegangan harus bervariasi selama pengereman regeneratif berkelanjutan, maka dapat mempertimbangkan bagaimana mengubah kecepatan motor tanpa beban dari kecepatan penuh dalam satu arah ke kecepatan penuh di arah yang lain dalam waktu sesingkat mungkin.

Pada kecepatan maju penuh, tegangan jangkar yang diterapkan diambil menjadi $+V$ (diperlihatkan sebagai 100% pada Gambar 6.2), dan karena motor tanpa beban, maka arus tanpa beban akan sangat kecil dan GGL balik hampir sama dengan V . Sehingga, tegangan jangkar $-V$ jelas dibutuhkan untuk membuat motor berjalan dengan kecepatan penuh secara terbalik. Tetapi tegangan yang diberikan tidak bisa begitu saja dibalikkan. Jika dilakukan, maka arus jangkar akan segera diberikan oleh $(-V - E)/R$, yang akan sangat tinggi. (Motor dapat mentolerirnya untuk periode singkat dan bertahan lama, namun tidak dengan catu).

Yang perlu dilakukan adalah mengatur tegangan sehingga arus selalu terbatas pada nilai pengenal dan ke arah yang benar. Jika menginginkan untuk melambat secepat mungkin, maka harus menjaga arus negatif dan pada nilai yang pengenal (yaitu -100%) selama periode perlambatan dan untuk menjalankan hingga kecepatan penuh secara terbalik. Hal ini akan memberi torsi konstan, sehingga perlambatan (dan percepatan berikutnya) akan konstan, dan kecepatan akan berubah pada laju yang seragam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.2.

Harus dicatat bahwa untuk memulainya, tegangan yang diterapkan harus dikurangi menjadi kurang dari GGL balik. Dan kemudian turun secara linear dengan waktu sehingga perbedaan antara V dan E dijaga konstan, sehingga menjaga arus konstan pada nilai pengenalnya. Selama berjalan terbalik, V harus secara numerik lebih besar dari E seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.2. (Perbedaan antara V dan E telah dilebihkan pada Gambar 6.2 agar jelas. Pada motor besar, perbedaannya mungkin hanya satu atau dua persen pada kecepatan penuh).

Daya ke dan dari catu ditunjukkan dalam plot bawah pada Gambar 6.2, energi diwakili oleh area yang diarsir. Selama periode perlambatan, sebagian besar energi kinetik motor (daerah berarsir bawah) secara bertahap dikembalikan ke catu, motor bertindak sebagai generator untuk keseluruhan waktu ini. Energi total yang diperoleh dengan cara ini dapat cukup besar untuk perangkat kemudi yang besar pada gilingan baja. Kuantitas energi yang serupa (daerah berarsir atas) dicatu dan disimpan sebagai energi kinetik ketika motor menambah kecepatan dalam putaran yang terbalik.



Gambar 6.2 Pembalikan regeneratif motor dc dari maju kecepatan penuh ke mundur kecepatan penuh, pada torsi (arus) maksimum yang diijinkan.

Tiga poin terakhir perlu ditekankan. Pertama, diasumsikan sepanjang diskusi bahwa catu dapat memberikan tegangan positif atau negatif, dan dapat menerima arus positif atau negatif. Maka perlu diperhatikan karena banyak konverter elektronik daya sederhana tidak memiliki fleksibilitas ini. Pengguna perlu menyadari bahwa jika operasi empat kuadran penuh (atau bahkan regenerasi dua kuadran) diperlukan, konverter dasar mungkin tidak akan memadai. Kedua, tidak dapat mengesampingkan gagasan bahwa untuk melakukan pembalikan pada Gambar 6.2, maka harus terlebih dahulu berlatih bagaimana cara menggambarkan tegangan yang

diterapkan sebagai fungsi waktu. Sistem perangkat kemudi biasanya memiliki fasilitas untuk mengoperasikan motor secara otomatis dalam mode arus konstan, dan yang harus dilakukan adalah mengatur kecepatan target baru. Terakhir, harus diingat bahwa pembahasan di atas berkaitan dengan motor yang terpisah. Jika pengereman regeneratif dilakukan untuk motor seri, maka koneksi ke medan atau jangkar harus dibalik untuk membalikkan arah torsi.

6.2 Pengereman Dinamis

Metode pengereman yang lebih sederhana dan lebih murah tetapi kurang efektif dapat dicapai dengan membuang energi kinetik motor dan memuat dalam sebuah resistor, daripada mengembalikannya ke catu. Versi teknik ini digunakan pada kemudi konverter elektronik daya yang lebih murah, yang tidak memiliki fasilitas untuk mengembalikan daya ke listrik.

Ketika motor harus dihentikan, catu ke dinamo dihilangkan dan resistor dialihkan melintasi sikat jangkar. Motor GGL menggerakkan arus (negatif) melalui resistor dan torsi negatif menghasilkan perlambatan. Saat kecepatan turun, maka GGL, arus dan torsi pengereman juga turun. Karenanya pada kecepatan rendah, torsi pengereman sangat kecil. Pada akhirnya, semua energi kinetik diubah menjadi panas pada resistensi jangkar motor dan resistensi eksternal. Pengereman awal yang sangat cepat diperoleh dengan menggunakan resistansi rendah (atau bahkan hanya menghubungkan-singkat jangkar). Pengereman dinamis masih banyak digunakan dalam traksi karena kesederhanaannya, meskipun sebagian besar skema angkutan cepat baru menggunakan proses pengereman regeneratif yang lebih hemat energi.

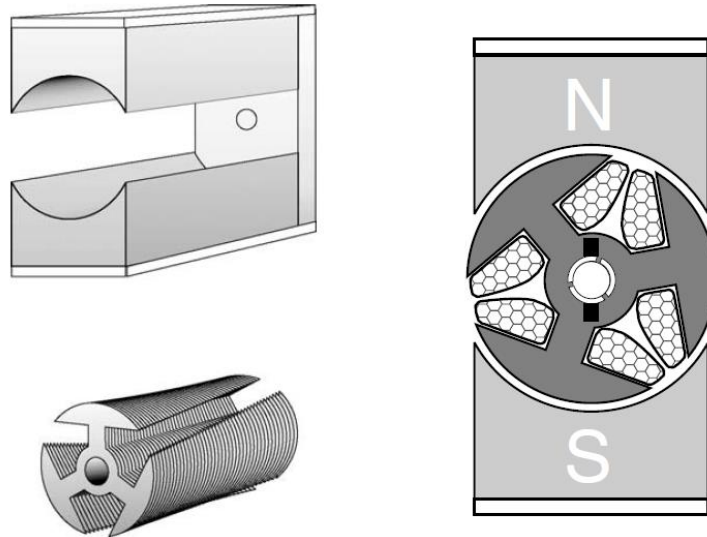
7. MOTOR MAINAN

Motor yang digunakan dalam mainan mobil, kereta, dll agak berbeda dengan konstruksi dari yang telah dibahas sejauh ini, terutama karena motor ini dirancang untuk dibuat murah. Motor ini juga berputar pada kecepatan tinggi, sehingga tidak membutuhkan untuk torsi menjadi halus. Susunan tipikal yang digunakan untuk diameter rotor dari 1 cm hingga mungkin 3 cm ditunjukkan pada Gambar 7.1.

Rotor dibuat dari laminasi dengan jumlah kecil (biasanya tiga atau lima) gulungan multi-lilitan dalam “celah” yang sangat besar, mudah dibuat, dan karena komutator memiliki beberapa segmen yang juga murah untuk dibuat. Sistem medan (stator) terdiri dari magnet keramik bermagnet radial dengan pelat baja untuk melengkapi rangkaian magnetik.

Rotor jelas memiliki arti penting yang sangat jelas, dengan tiga gambaran besar yang sangat kontras dengan rotor yang terlihat sebelumnya di mana permukaan pada dasarnya berbentuk silindris. Sangat mudah untuk membayangkan bahwa, bahkan ketika tidak ada arus dalam gulungan rotor, ada kecenderungan kuat pada magnet stator untuk menarik satu atau lebih dari rotor menjadi sejajar dengan kutub stator sehingga rotor cenderung untuk mengunci salah satu dari enam posisi. Siklus torsi “detent” ini disebabkan oleh variasi reluktansi dengan posisi rotor, efek yang diambil dalam motor reluktansi ac tetapi tidak diinginkan di sini. Untuk mengatasi masalah tersebut, laminasi rotor dibuat miring sebelum gulungan dipasang, seperti yang ditunjukkan pada sketsa bawah di sebelah kiri.

Masing-masing dari tiga kutub rotor membawa kumparan multi-lilitan, yang awalnya dihubungkan ke segmen komutator, seperti yang ditunjukkan pada penampang di sebelah kanan Gambar 7.1. Ketiga ujungnya disatukan. Sikat lebih lebar daripada ruang antar segmen, sehingga dalam beberapa posisi rotor, arus dari sikat positif akan membagi dan mengalir pertama melalui dua kumparan secara paralel hingga mencapai titik umum, kemudian melalui kumparan ketiga ke sikat negatif. Sementara di posisi lain arus mengalir hanya melalui dua kumparan.



Gambar 7.1 Miniatur motor dc pada model mainan.

Perlu imajinasi nyata untuk menggambarkan mekanisme produksi torsi menggunakan pendekatan “*Bil*” yang telah dibahas sebelumnya karena geometrinya sangat berbeda. Tetapi pendekatan yang lebih intuitif dapat diambil dengan mempertimbangkan untuk setiap posisi, polaritas dan kekuatan magnetisasi masing-masing dari tiga kutub rotor, yang tentu saja tergantung pada arah dan besarnya arus masing-masing. Setelah diskusi dalam paragraf sebelumnya, dapat dilihat bahwa di beberapa posisi akan ada kutub N kuat dan dua kutub S yang relatif lemah. Sementara di sisi lain akan ada satu kutub N kuat, satu kutub S kuat, dan satu kutub yang tidak dieksplorasi.

Jadi, meskipun rotor tampaknya menjadi perangkat 3-kutub, pola magnetisasi selalu 2-kutub (karena dua kutub S lemah yang berdekatan berfungsi sebagai satu kutub S yang kuat). Saat rotor berputar, kutub stator N akan menarik kutub rotor S terdekat ke arah penyelarasan. Ketika gaya tarik berkurang ke nol, komutator membalikkan arus rotor di kutub sehingga menjadi kutub N dan didorong menjauh menuju kutub S stator.

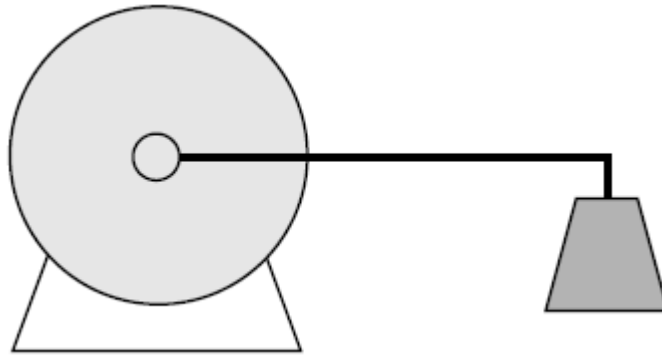
Ada variasi arus dengan posisi sudut sebagai akibat dari berbagai resistensi yang terlihat oleh sikat ketika mereka secara bergantian melakukan kontak dengan salah satu atau dua segmen, dan torsi jauh dari seragam, tetapi kecepatan operasi biasanya beberapa ribu putaran/menit dan pulsasi torsi dihaluskan oleh rotor dan inersia beban.

PERTANYAAN ULASAN

Sembilan soal pertama menguji pemahaman umum, soal 10 hingga 18 adalah masalah numerik terutama berdasarkan pada rangkaian ekuivalen, soal 19 hingga 26 adalah pertanyaan diskursif terkait dengan mesin dc, dan pertanyaan yang tersisa lebih menantang dengan bias aplikasi.

1. Apa parameter primer (eksternal) yang menentukan kecepatan motor dc tanpa beban?
2. Apa faktor eksternal utama yang menentukan arus pada saat motor dc berjalan pada kondisi keadaan tunak, untuk setiap tegangan jangkar yang diberikan?
3. Apa yang menentukan arus kecil yang ditarik oleh motor dc saat berjalan tanpa ada beban mekanik yang diterapkan?
4. Apa yang menentukan seberapa besar kecepatan motor dc berkurang ketika beban pada porosnya meningkat? Mengapa motor kecil lebih melambat dari motor besar?
5. Apa yang harus dilakukan untuk membalikkan arah rotasi:
 - a) Motor tereksitasi terpisah,
 - b) Motor *shunt*,
 - c) Motor seri?
6. Kebanyakan motor dc dapat menghasilkan lebih dari torsi kontinyu. Mengapa torsi kontinyu perlu dibatasi?
7. Apa perbedaan mendasar antara motor dc dan generator dc?
8. Dari sudut pandang catu, motor dc tanpa beban yang berjalan ringan terlihat seperti resistansi tinggi, tetapi ketika dijalankan pada beban penuh sepertinya resistansi yang jauh lebih rendah. Kenapa?
9. Mengapa motor dc berjalan lebih cepat ketika aliran medan berkurang?
10. Motor dc tereksitasi terpisah beroperasi dari pasokan 220 V dan menarik arus jangkar 15 A. Resistensi jangkar adalah $0,8\Omega$. Hitung tegangan (GGL balik) yang dihasilkan. Jika arus bidang tiba-tiba berkurang 10%, hitung
 - a) nilai naiknya arus jangkar sementara,
 - b) persentase kenaikan torsi ketika arus mencapai nilai dalam (a).Abaikan induktansi jangkar, abaikan saturasi, dan asumsikan bahwa aliran medan berbanding lurus dengan arus medan.
11. Mesin dc terhubung *shunt* yang digerakkan oleh mesin diesel memasok arus 25 A ke baterai 110 V. Resistansi jangkar dan medan masing-masing adalah $0,5\Omega$ dan 110Ω , dan total gesekan, resistansi udara dan kerugian lainnya 220 W. Hitung (a) GGL yang dihasilkan, (b) efisiensi.

12. Motor 250 V dc dengan resistansi jangkar 1V sedang berjalan tanpa beban pada 1800 putaran/menit dan menarik arus 2 A. Estimasikan torsi gesek.
13. Tegangan apa yang diharapkan di terminal jangkar motor pada pertanyaan 12 segera setelah tiba-tiba terputus dari catu 250 V?
14. Arus beban penuh motor pada pertanyaan 12 adalah 32 A. Estimasikan kecepatan beban penuh dan torsi terukur.
15. a) Ketika digerakkan pada 1500 putaran/menit tegangan jangkar sirkuit terbuka dari mesin dc adalah 110 V. Hitung konstanta ggl dalam volt per radia/detik. Hitung juga torsi mesin saat arus jangkar adalah 10 A.
b) Misalkan mesin diam, dan berat 5 kg ditanggihkan dari batang horizontal panjang 80 cm yang melekat pada poros, seperti yang ditunjukkan pada Gambar Q 1.1



Gambar Q1. 1.

- Berapa arus yang harus diterapkan pada jangkar untuk menjaga agar lengan tetap horisontal? Akankah keseimbangan menjadi stabil? (Abaikan massa batang; $g = 9,81\text{m/s}^2$)
- c) Ketika mesin beroperasi sebagai motor yang mengambil 25 A dari catu 110 V, kecepatannya adalah 1430 putaran/menit. Hitung resistensi jangkar. Kemudian temukan tegangan yang diperlukan untuk menjaga batang tetap horisontal.
 - d) Pada kecepatan berapa mesin harus dijalankan untuk memasok 3,5 kW ke sistem 110 V? Hitung torsi yang sesuai. Jika rangkaian medan mengkonsumsi 100 W dan kerugian gesekan adalah 200 W, hitung efisiensi generator.
16. Pabrikkan motor mainan 12 V dengan resistansi jangkar 8Ω mengklaim bahwa motor dapat menghasilkan torsi 20mNm pada 5000 putaran/menit. Buktikan bahwa klaim ini tidak benar.
 17. Hasil tes berikut diperoleh pada motor dc kecil *ironless-rotor permanent-magnet* yang digunakan untuk perangkat kemudi *print-head*:
Resistansi jangkar = $2,9\Omega$
Kecepatan ketika menjalankan tanpa beban dengan menerapkan 6 V = 8000 putaran/menit
Arus ketika berjalan tanpa beban dengan menerapkan 6 V = 70mA

Inersia rotor = $0,138 \times 10^{-6} \text{kg m}^2$

Hitung GGL yang diinduksi dan torsi gesekan saat berjalan ringan dengan menerapkan 6 V, dan estimasi akselerasi awal dari keadaan diam ketika motor dialihkan langsung ke catu 6 V.

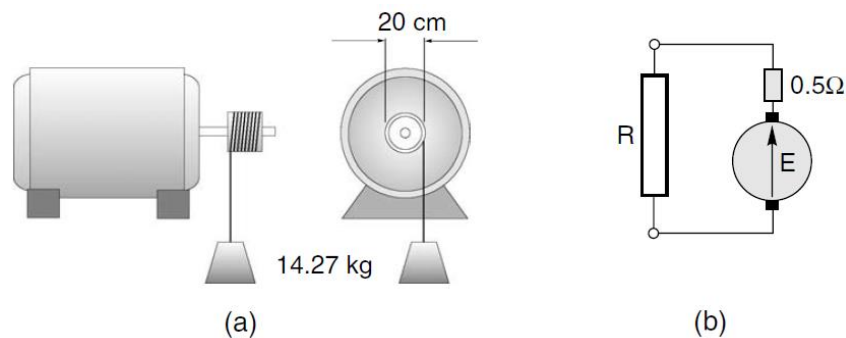
18. Persamaan yang menyatakan torsi dalam hal arus ($T = kI$) dan gerak GGL dalam hal kecepatan ($E = k\omega$) sangat penting dalam memahami pengoperasian mesin dc. Hanya menggunakan persamaan ini, tunjukkan bahwa daya keluaran mekanik diberikan oleh $W = EI$.
19. Seorang pelanggan menemukan motor 24 W, 5000 putaran/menit dengan ketahanan jangkar $0,8\Omega$ yang sesuai dengan aplikasinya. Namun motor tersebut 12 V dan satu-satunya catu yang ia miliki adalah 24 V. Penjual motor mengatakan bahwa ia dapat menyediakan versi 24 V sebagai gantinya. Apa perbedaan antara versi 24 V dengan versi 12 V?
20. Jelaskan secara singkat mengapa:
 - a) motor dc besar biasanya tidak dapat *starting* dengan menggunakan tegangan penuh,
 - b) kecepatan tanpa beban dari motor magnet permanen hampir sebanding dengan tegangan jangkar,
 - c) motor dc menarik lebih banyak arus dari catu ketika beban pada poros dinaikkan,
 - d) belitan medan motor dc mengkonsumsi energi secara terus menerus meskipun tidak berkontribusi pada daya keluaran mekanik,
 - e) kutub medan dari mesin dc tidak selalu dilaminasi.
21. Motor dc tereksitasi terpisah bergerak ringan dengan tegangan jangkar konstan. Ketika arus medan tiba-tiba berkurang sedikit, arus jangkar meningkat secara substansial dan kecepatan naik untuk menetap di level yang lebih tinggi. Jelaskan peristiwa ini dengan bantuan sirkuit ekuivalen dan penjelasan tentang persamaan yang relevan.
22. Motor tereksitasi terpisah yang digunakan dalam traksi memiliki rangkaian kendali medan yang memastikan bahwa aliran medan berbanding lurus dengan arus jangkar. Gambarkan kurva kecepatan-torsi untuk motor saat beroperasi dengan kisaran tegangan jangkar.
23. Motor dc magnet permanen kecil memiliki resistansi jangkar 1Ω . Berapa daya keluaran mekanis maksimum yang mungkin ketika jangkar dicatu pada 12 V? Mengapa kondisi daya maksimum ini hanya menarik secara teoritis untuk motor besar?
24. Jelaskan secara singkat mengapa motor universal dapat beroperasi pada ac atau dc.
25. Dalam buku ini diklaim bahwa motor dengan ukuran dan daya tertentu dapat dibuat tersedia untuk beroperasi pada tegangan berapa pun. Tetapi jelas bahwa peralatan tangan bertenaga baterai dari ukuran dan kecepatan yang diberikan, versi tegangan tinggi menjadi lebih kuat. Apa yang menyebabkan kontradiksi ini?

26. Motor seri akan bekerja pada ac karena medan dan arus jangkar berbalik secara bersamaan, sehingga torsi tetap searah. Jika motor yang terhubung *shunt* dicatu dengan ac, tegangan pada jangkar dan medan akan berbalik bersama. Jadi apakah itu juga tidak bekerja dengan memuaskan?

27. Pertanyaan ini berkaitan dengan mesin dc magnet permanen dengan ketahanan jangkar $0,5\Omega$.

Ketika rotor digerakkan pada 1500 putaran/menit oleh sumber mekanik eksternal, tegangan jangkar *open-circuit* adalah 220 V. Semua bagian dari pertanyaan berhubungan dengan kondisi keadaan tunak, yaitu setelah semua transien mati.

Mesin ini akan digunakan sebagai generator dan bertindak sebagai rem dinamis untuk menahan beban yang lebih rendah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar Q1.2(a). Massa gantung 14,27 kg tergantung pada tali dari drum gulungan diameter 20 cm pada poros motor.



Gambar Q1.2.

Mayoritas daya yang dihasilkan harus didisipasi dalam resistor eksternal (R) yang terhubung melintasi jangkar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar Q1.2(b).

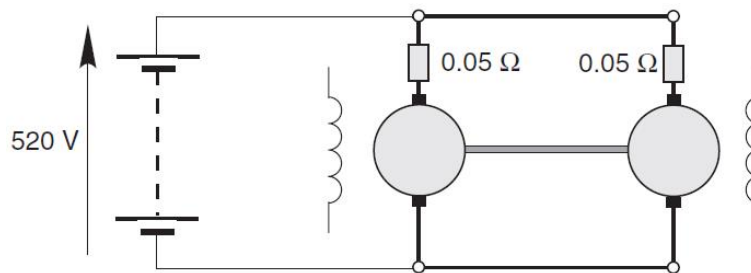
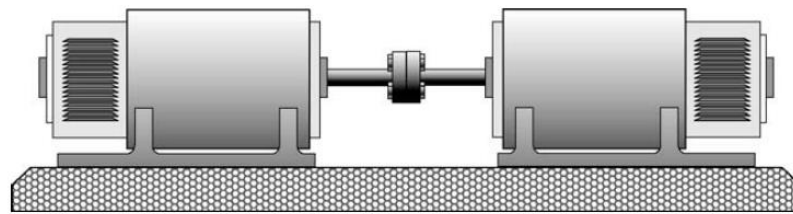
- Hitung nilai resistansi yang diperlukan sehingga massa turun dengan kecepatan stabil 15 m/s. (Ambil $g = 9,81\text{m/s}^2$)
- Berapakah daya yang didisipasi pada (i) resistor eksternal, (ii) jangkar? Dari mana datangnya energi yang didisipasi dalam resistor?

28. Pertanyaan ini adalah tentang perilaku dinamis (transien) selama pengereman dinamis di mana mesin bertindak sebagai generator untuk mengubah energi kinetiknya menjadi panas dalam sebuah resistor. Familiaritas dengan persamaan diferensial orde pertama diperlukan untuk menjawab pertanyaan sepenuhnya. Motor dc magnet permanen dengan resistansi jangkar 1Ω berjalan pada 3000 putaran/menit dan menarik arus 10 A dari catu 200 V. Hitung konstanta motor.

Jika motor berjalan tanpa beban dari catu 100 V dan catu kemudian tiba-tiba terputus dan terminal jangkar terhubung ke resistor 4Ω , tunjukkan bahwa kecepatan meluruh secara eksponensial dengan konstanta waktu 2,73 detik. Kemudian hitung waktu yang dibutuhkan

untuk mengurangi kecepatan hingga 100 putaran/menit. Ambil inersia efektif sebagai $0,2 \text{ kg m}^2$ dan abaikan gesekan.

29. Ketika jangkar motor dc magnet permanen tanpa beban disediakan dengan arus yang bervariasi secara sinusoid pada frekuensi $0,5 \text{ Hz}$, kecepatan bervariasi dari $+2000$ putaran/menit hingga -2000 putaran/menit. Estimasi rentang kecepatan ketika frekuensi dinaikkan menjadi 5 Hz , arus puncak tetap sama.
30. Dua mesin 200 kW , 520 V , 420 A , 1000 putaran/menit dc yang baru dan identik harus diuji pada beban hampir penuh dengan menyambungkan porosnya, sehingga mesin satu akan bertindak sebagai generator untuk memasok daya ke mesin yang lain, yang akan bertindak sebagai motor dan menggerakkan generator. Dengan cara ini diharapkan bahwa produsen tidak perlu menyediakan pasokan listrik berkekuatan tinggi, atau rig pemuatan mekanis tugas berat. Kedua jangkar terhubung secara paralel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar Q1.3. Ketika keduanya berputar, polaritas gerakan GGL dalam dua mesin sedemikian rupa sehingga tidak ada kecenderungan arus mengalir di antara kedua mesin.



Gambar Q1.3.

Kedua mesin tereksitasi terpisah, dan arus medan keduanya dapat disesuaikan secara manual. Arus medan dari kedua mesin pertama diset pada level normal (pengenal), dan keluaran dari catu dc dinaikkan secara bertahap (untuk menghindari lonjakan arus berlebih) sampai tegangan jangkar 520 V dan motor berjalan pada kecepatan tanpa beban dari $1040,2$ putaran/menit. Dalam kondisi ini, dengan asumsi bahwa ada keseimbangan sempurna, kedua motor menarik $18,5 \text{ A}$, membuat total 37 A dari sumber dc. Arus ini mencerminkan torsi yang diperlukan untuk mengatasi gesekan udara, gesekan, dan kerugian besi.

Jika resistansi rangkaian jangkar setiap mesin adalah $0,05\Omega$, dan penurunan tegangan pada sikat diabaikan, estimasikan untuk setiap mesin:

- a) Gerak GGL tanpa beban,
- b) kerugian daya rangkaian jangkar tanpa beban,
- c) kerugian daya mekanis (gesekan dan belitan),
- d) torsi tanpa beban.

Sekarang anggaplah bahwa arus medan (dan karenanya aliran) dari mesin 1 dikurangi secara bertahap sampai arus pada mesin 1 mencapai nilai pengenal 420 A.

Dengan asumsi bahwa pasokan dc bertindak sebagai sumber tegangan ideal, atur dua persamaan jangkar dan persamaan keseimbangan torsi dan pecahkanlah untuk menemukan:

- a) kecepatan mesin,
- b) arus dalam mesin 2,
- c) torsi bersih,
- d) daya yang disediakan oleh sumber dc, sebagai persentase dari daya pengenal dari setiap mesin.

Sehubungan dengan jawaban di atas, beri komentar tentang sejauh mana dapat diklaim bahwa mesin telah diuji pada beban penuh, dan dalam hal ekonomi, catu daya yang diperlukan untuk melakukan pengujian.

BAGIAN 2 KEMUDI MOTOR DC

PENDAHULUAN

Secara historis, motor dc mendahului motor ac. Karena kemampuannya menyediakan kecepatan dan kendali torsi mudah, selama beberapa dekade, motor dc menjadi pilihan untuk sistem penggerak listrik yang memerlukan operasi kecepatan variabel. Kemudahan kendali pada motor dc pada umumnya dalam kecepatan putar motor dc sebanding dengan tegangan yang diberikan ke jangkar, dan torsi yang berkembang sebanding dengan arus jangkar. Oleh karena itu cukup mudah untuk mengendalikan motor tersebut (misal melalui konverter dc-dc).

Pengoperasian motor dc listrik konvensional didasarkan pada interaksi medan stator dan rotor. Medan stator dihasilkan oleh magnet permanen yang biasanya terpasang pada stator motor. Peran kunci dalam pengoperasian motor adalah memainkan komutator dc. Peran komutator adalah menjaga torsi motor dc tidak terbalik setiap kali koil bergerak melalui bidang tegak lurus terhadap medan magnet. Komutator adalah perangkat cincin terpisah yang beroperasi seperti penyearah mekanis. Cincin ini diperlukan karena lilitan jangkar berputar, dan tanpa komutator, motor akan berhenti ketika dua kutub yang berlawanan saling berhadapan.

Kemudi (penggerak) dc thyristor tetap merupakan kemudi industri kecepatan terkendali yang penting, terutama di mana biaya perawatan yang lebih tinggi terkait dengan sikat motor dc (motor induksi) dapat ditoleransi. Penyearah yang dikendalikan (thyristor) menyediakan tegangan “dc” impedansi yang dapat disetel untuk jangkar motor, sehingga memberikan kendali kecepatan.

Sampai tahun 1960-an, satu-satunya cara yang benar-benar memuaskan untuk mendapatkan catu tegangan variabel dc yang diperlukan untuk kendali kecepatan motor dc industri adalah dengan menghasilkannya dengan generator dc. Generator digerakkan pada kecepatan tetap oleh motor induksi, dan medan generator bervariasi untuk memvariasikan tegangan yang dihasilkan. Pengaturan motor/generator (MG) dapat ditempatkan jauh dari motor dc, dan multi-kemudi (*multi-drive*), misal pabrik baja, akan memiliki ruangan besar penuh dengan set MG, satu untuk setiap motor berkecepatan variabel pada pabrik. Tiga mesin (semua rating daya yang sama) diperlukan untuk masing-masing kemudi “Ward Leonard” ini, yang merupakan bisnis yang bagus untuk pabrikan motor. Pada periode singkat, tahun 1950-an digantikan oleh penyearah busur merkuri yang dikendalikan oleh jaringan. Tetapi segera digantikan oleh konverter thyristor yang menawarkan biaya yang lebih murah, efisiensi yang lebih tinggi (biasanya lebih dari 95%), ukuran lebih kecil, berkurangnya pemeliharaan, dan respon yang lebih cepat untuk perubahan dalam kecepatan yang ditetapkan. Kerugian dari catu yang disearahkan adalah bahwa bentuk

gelombang tidak murni dc. Kapasitas beban lebih konverter sangat terbatas, dan bahwa konverter tunggal tidak mampu regenerasi.

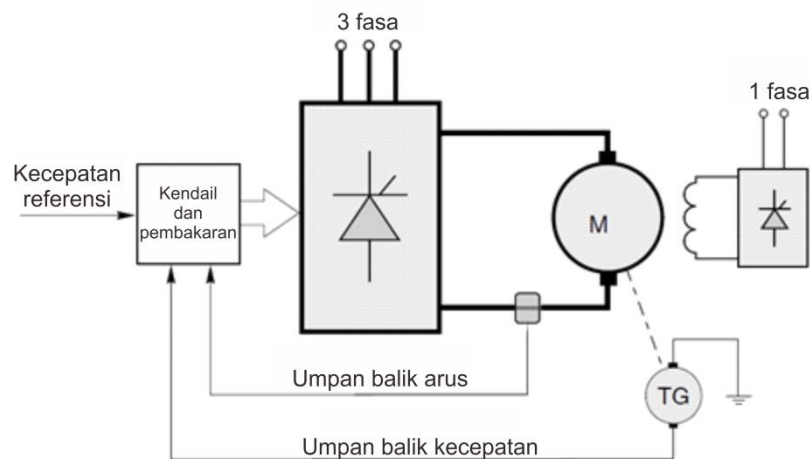
Meskipun tidak lagi unggul, studi tentang kemudi dc bermanfaat karena beberapa alasan:

- Struktur dan pengoperasian kemudi dc tercermin di hampir semua kemudi lain, dan pelajaran yang dipetik dari studi kemudi dc.
- Kemudi dc cenderung tetap menjadi tolok ukur penilaian kemudi lain.
- Di bawah kondisi aliran konstan, perilaku diatur oleh seperangkat persamaan linear yang relatif sederhana, sehingga tidak sulit untuk memprediksi perilaku keadaan tunak dan transient.
- Ketika beralih ke penerus kemudi dc, terutama kemudi motor induksi, maka akan ditemukan bahwa segalanya jauh lebih kompleks. Dan untuk mengatasi perilaku transien yang buruk, strategi yang diadopsi didasarkan pada meniru kemudi dc.

Bagian pertama dan utama dari pembahasan ini dikhususkan untuk kemudi dengan thyristor. Setelah itu akan dibahas secara singkat beberapa kemudi *chopper* yang digunakan terutama dalam ukuran sedang dan kecil, dan akhirnya mengalihkan pembahasan ke kemudi tipe servo kecil.

8. KEMUDI DC THYRISTOR-UMUM

Untuk motor hingga beberapa kilowatt, konverter jangkar dapat dicatu dari induk fasa tunggal atau tiga fasa, tetapi untuk motor yang lebih besar, catu tiga fasa selalu digunakan. Thyristor atau dioda penyearah (rectifier) yang terpisah digunakan untuk mencatu medan motor. Daya jauh lebih kecil dari daya jangkar, sehingga catu sering dengan fasa tunggal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.1.



Gambar 8.1 Diagram skematik kemudi kendali kecepatan motor dc.

Susunan yang ditunjukkan pada Gambar 8.1 adalah tipikal dari sebagian besar kemudi dc dan menyediakan kendali kecepatan *loop* tertutup. Fungsi dari dua *loop* kendali akan dijelaskan nanti.

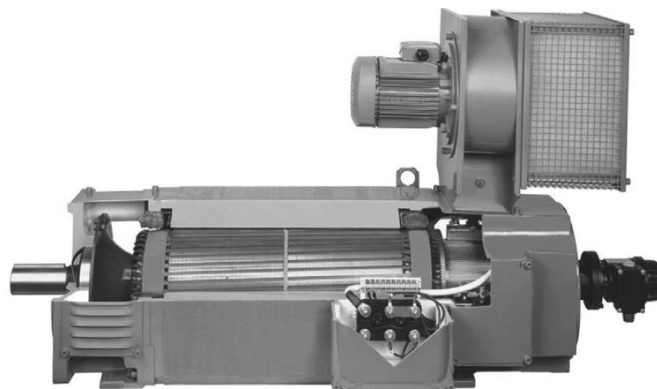


Plate 3 Motor dc *force-ventilated* kinerja tinggi. Motor ini terbuat dari konstruksi yang seluruhnya berlapis dan dirancang untuk digunakan dengan konverter thyristor. Motor peniup kecil adalah mesin induksi yang bekerja terus menerus, sehingga memungkinkan motor utama mempertahankan torsi penuh pada kecepatan rendah tanpa panas berlebih.

Rangkaian daya utama terdiri dari rangkaian jembatan enam-thyristor yang memperbaiki catu ac yang masuk untuk menghasilkan catu dc ke jangkar motor. Perakitan thyristor, yang dipasang di pendingin (*heatsink*), biasanya disebut sebagai “*stack*”. Dengan mengubah sudut penyalan thyristor nilai rata-rata dari tegangan yang telah disearahkan dapat bervariasi, sehingga memungkinkan kecepatan motor dikendali.

Penyearah terkendali menghasilkan bentuk kasar dari dc dengan riak yang jelas dalam tegangan keluaran. Komponen riak ini menimbulkan arus dan pulsa aliran dalam motor. Dan untuk menghindari kerugian *eddy current* yang berlebihan dan masalah komutasi, kutub dan rangka harus terbuat dari konstruksi yang dilaminasi. Cara ini adalah praktik yang diterima untuk motor yang dicatu untuk digunakan dengan kemudi thyristor untuk memiliki konstruksi laminasi. Tetapi motor yang lebih tua sering memiliki kutub dan/atau rangka yang solid, dan ini tidak akan selalu bekerja dengan baik dengan catu penyearah. Ini juga merupakan norma untuk motor penggerak yang dilengkapi dengan motor “*blower*” yang terpasang sebagai standar untuk secara terus menerus mengalirkan melalui ventilasi sehingga memungkinkan motor untuk beroperasi terus menerus pada torsi penuh bahkan ke kecepatan terendah tanpa panas berlebih.

Rangkaian kendali daya rendah digunakan untuk memonitor variabel utama yang menarik (biasanya arus dan kecepatan motor), dan untuk menghasilkan pulsa yang tepat sehingga motor mempertahankan kecepatan konstan meskipun ada variasi dalam beban. “Referensi kecepatan” (Gambar 8.1) biasanya merupakan tegangan analog yang bervariasi dari 0 hingga 10 V, dan diperoleh dari potensiometer pengaturan kecepatan manual atau dari tempat lain di pabrik.

Kombinasi dari rangkaian daya, kendali dan pelindung merupakan konverter. Konverter modular standar tersedia dalam ukuran mulai dari 0,5 kW hingga beberapa ratus kW. Sementara kemudi yang lebih besar akan disesuaikan dengan kebutuhan individu. Konverter individual dapat dipasang di selengkap dengan isolator, sekering dan lain-lain, atau kelompok konverter dapat dipasang bersama untuk membentuk kemudi multi-motor.

8.1 Pengoperasian Motor Dengan Suplai Konverter

Sekarang pembahasan beralih ke masalah bagaimana motor dc berperilaku ketika dicatu dengan “dc” dari penyearah terkendali.

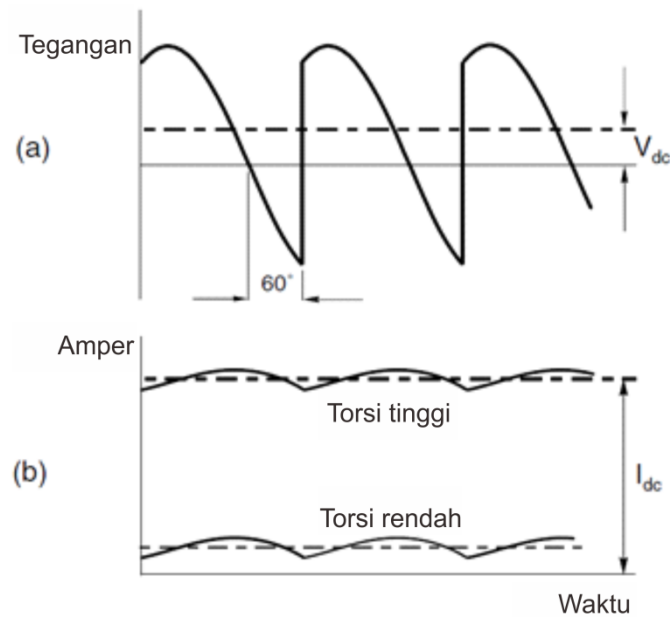
Bentuk gelombang tegangan jangkar dianggap sebagai dc yang baik. Dan dianggap aneh jika memberi bentuk gelombang yang tidak baik ke motor dc. Faktanya, ternyata motor bekerja hampir sebaik jika diberi dengan dc murni karena dua alasan utama. Pertama, induktansi jangkar motor menyebabkan bentuk gelombang arus jangkar menjadi lebih halus daripada gelombang tegangan jangkar, yang pada gilirannya berarti bahwa riak torsi jauh lebih sedikit daripada yang dikhawatirkan. Dan kedua, inersia jangkar cukup besar agar kecepatannya tetap stabil meski ada riak torsi. Memang menguntungkan bahwa pengaturan sederhana seperti itu bekerja dengan sangat baik. Karena berbagai upaya untuk menghaluskan gelombang tegangan (mungkin dengan menambahkan kapasitor penghalus (*smoothing*)) akan sangat mahal dalam rentang daya yang diinginkan.

8.2 Bentuk Gelombang Arus Motor

Untuk kesederhanaan, akan dibahas operasi dari konverter fasa tunggal (2-pulsa), tetapi kesimpulan serupa berlaku untuk konverter 6-pulsa. Tegangan (V_a) yang diterapkan pada jangkar motor tipikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.2(a). Terdiri dari “*chunk*” yang disearahkan dari tegangan listrik yang masuk. Bentuk presisi dan nilai rata-rata tergantung pada sudut penyalaan.

Bentuk gelombang tegangan dapat dianggap terdiri dari tingkat dc rata-rata (V_{dc}), dan komponen riak dapat disebut sebagai V_{ac} . Tegangan rata-rata V_{dc} dapat diubah dengan memvariasikan sudut penyalaan, yang juga secara tidak langsung mengubah riak (misal V_{ac}).

Tegangan riak menyebabkan arus riak mengalir di jangkar, tetapi karena induktansi jangkar, amplitudo arus riak menjadi kecil. Dengan kata lain, jangkar menyajikan impedansi tinggi ke tegangan ac. Efek penghalus dari induktansi jangkar ini ditunjukkan pada Gambar 8.2(b), yang dapat dilihat bahwa riak arus relatif kecil dibandingkan dengan riak tegangan yang sesuai. Nilai rata-rata arus riak tentu saja nol, sehingga tidak berpengaruh pada torsi rata-rata motor. Namun demikian terdapat variasi torsi setiap setengah siklus listrik, tetapi karena amplitudo kecil dan frekuensi tinggi variasi dalam kecepatan (dan karenanya GGL balik, E) biasanya tidak akan terlihat.



Gambar 8.2 Tegangan jangkar (a) dan arus jangkar (b) bentuk gelombang untuk operasi arus kontinu dari motor dc yang dicatu dari konverter thyristor sepenuhnya tunggal terkendali penuh, dengan sudut penyalaan 60° .

Arus pada akhir setiap pulsa sama dengan di awal, sehingga mengikuti bahwa tegangan rata-rata melintasi induktansi jangkar (L) adalah nol. Oleh karena itu, tegangan rata-rata yang diterapkan dapat disamakan dengan jumlah GGL balik (diasumsikan dc murni karena fluktuasi kecepatan diabaikan) dan tegangan rata-rata melintasi resistansi jangkar, untuk menghasilkan

$$V_{dc} = E + I_{dc}R \quad (8.1)$$

yang persis sama dengan operasi dari catu dc murni. Hal ini sangat penting, karena fakta bahwa tegangan motor rata-rata dapat dikendali, dan karenanya kecepatan, cukup dengan memvariasikan sudut tunda konverter.

Efek penghalus dari induktansi jangkar penting dalam mencapai kesuksesan operasi motor. Jangkar bertindak sebagai tapis pelolos rendah (*low-pass filter*), menghalangi sebagian besar riak dan menyebabkan arus jangkar yang kurang lebih konstan. Agar penghalus efektif, konstanta waktu jangkar perlu lama dibandingkan dengan durasi pulsa (setengah siklus dengan kemudi 2-pulsa, tetapi hanya seperenam siklus dalam kemudi 6-pulsa). Kondisi ini terpenuhi di semua kemudi 6-pulsa, dan di banyak 2-pulsa. Secara keseluruhan, motor kemudian berperilaku seperti itu jika dicatu dari sumber dc yang ideal (meskipun kehilangan I^2R lebih tinggi daripada jika arus halus).

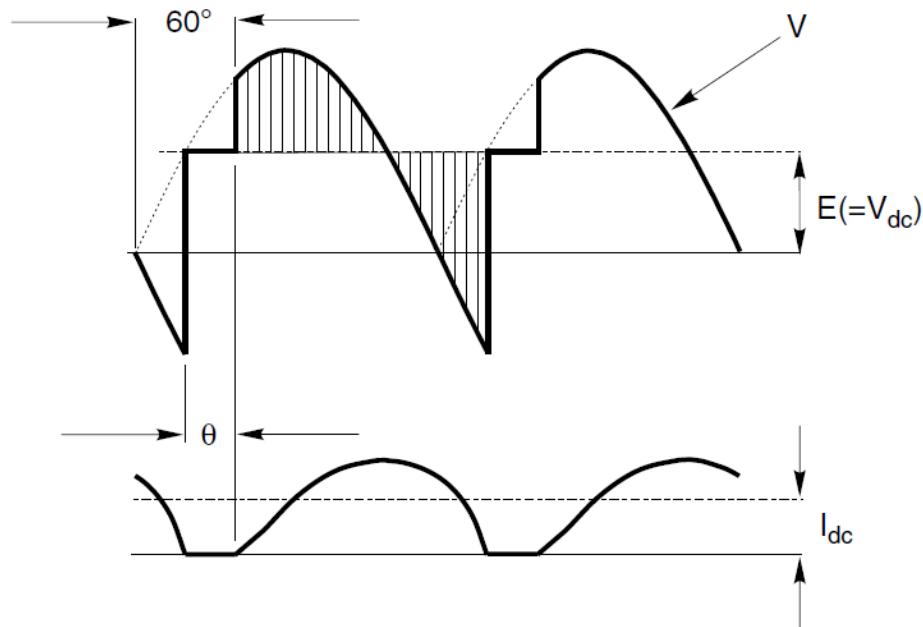
Kecepatan tanpa beban ditentukan oleh tegangan yang diberikan (yang tergantung pada sudut penyalan konverter). Ada penurunan kecil dalam kecepatan dengan beban dan seperti yang telah dicatat sebelumnya, arus rata-rata ditentukan oleh beban. Pada Gambar 8.2, misalnya, bentuk gelombang tegangan pada (a) berlaku sama untuk dua kondisi beban yang diwakili dalam (b), di mana bentuk gelombang arus atas sesuai dengan nilai torsi beban yang tinggi. Sedangkan arus yang bawah untuk beban yang jauh lebih ringan. Kecepatannya hampir sama dalam kedua kasus. Perbedaan kecil dalam kecepatan adalah karena IR . Harus dicatat bahwa riak arus tetap sama, hanya arus rata-rata berubah dengan beban. Secara garis besar, oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa kecepatan ditentukan oleh sudut penyalan konverter, yang mewakili keadaan yang sangat bagus. Karena sudut penyalan dapat dikendalikan dengan rangkaian kendali daya rendah, dan dengan demikian mengatur kecepatan kemudi.

Bentuk gelombang arus pada Gambar 8.2(b) disebut sebagai “kontinyu”, karena tidak pernah ada waktu di mana arus tidak mengalir. Kondisi “arus kontinyu” ini adalah norma di sebagian besar kemudi. Dan sangat diinginkan karena hanya di bawah kondisi arus kontinyu tegangan rata-rata dari konverter ditentukan semata-mata oleh sudut penyalan dan tidak tergantung pada arus beban. Dapat dilihat mengapa hal ini terjadi, membayangkan bahwa motor terhubung ke terminal keluaran dan menarik arus kontinyu. Selama setengah dari siklus lengkap, arus akan mengalir ke motor dari T1 dan kembali ke listrik melalui T4. Sehingga jangkar secara efektif beralih melintasi catu dan tegangan jangkar sama dengan tegangan catu, yang dianggap ideal, yaitu tidak tergantung pada arus yang ditarik. Untuk separuh waktu lainnya, arus motor mengalir dari T2 dan kembali ke catu melalui T3, sehingga motor kembali terhubung ke catu, tetapi kali ini koneksi terbalik. Oleh karena itu tegangan jangkar rata-rata (dan karenanya untuk perkiraan pertama kecepatan) ditentukan setelah *ring angle* diatur.

8.3 Arus Diskontinyu

Dapat dilihat dari Gambar 8.2 bahwa ketika torsi beban berkurang, akan datang titik di mana minima dari riak arus menyentuh garis arus nol (*zerocurrent*), yaitu arus mencapai batas antara arus kontinyu dan diskontinyu. Beban di mana hal ini terjadi juga akan tergantung pada induktansi jangkar, karena semakin tinggi induktansi maka semakin lancar arus (yaitu semakin sedikit riak). Oleh karena itu, mode arus diskontinyu kemungkinan besar ditemui pada mesin kecil dengan induktansi rendah (terutama ketika diumpankan dari konverter dua-pulsa) dan dalam kondisi beban ringan atau tanpa beban.

Tegangan jangkar dan bentuk gelombang arus khas dalam mode diskontinyu ditunjukkan pada Gambar 8.3. Arus jangkar terdiri dari pulsa diskrit dari arus yang terjadi hanya saat jangkar terhubung ke catu, dengan nol arus untuk periode tersebut (ditunjukkan oleh θ pada Gambar 8.3) ketika tidak ada thyristor yang mengalirkan dan motor meluncur bebas dari catu.



Gambar 8.3 Bentuk gelombang tegangan-arus jangkar untuk operasi arus diskontinyu motor dc yang dicatu dari konverter thyristor fasa tunggal terkendali penuh, dengan sudut penyalan 60° .

Bentuk gelombang arus dapat dipahami dengan mencatat bahwa dengan resistensi diabaikan, persamaan (2.6) dapat disusun ulang sebagai

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(V - E) \quad (8.2)$$

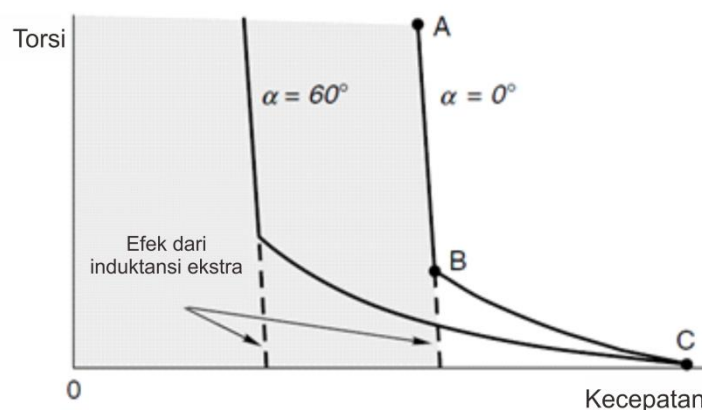
yang menunjukkan bahwa laju perubahan arus (yaitu gradien grafik bawah pada Gambar 8.3) ditentukan oleh perbedaan sesaat antara tegangan yang diberikan V dan gerakan GGL E . Nilai $(V - E)$ ditunjukkan oleh garis vertikal pada Gambar 8.3, yang dapat dilihat bahwa jika $V > E$, arus meningkat, sedangkan jika $V < E$, arus turun. Arus puncak dengan demikian ditentukan oleh luas area berarsir atas atau bawah dari grafik atas.

Sudut penyalan pada Gambar 8.2 dan Gambar 8.3 adalah sama, pada 60° . Tetapi beban kurang pada Gambar 8.3 dan karenanya arus rata-rata lebih rendah (meskipun, demi penjelasan yang ditawarkan di bawah sumbu arus pada Gambar 8.3 diperluas sebagai perbandingan dengan yang ada pada Gambar 8.2). Harus jelas dengan membandingkan grafik ini bahwa bentuk

gelombang tegangan jangkar (garis tebal) berbeda karena, pada Gambar 8.3, arus turun ke nol sebelum pulsa penyalaan berikutnya tiba. Dan selama periode yang ditunjukkan ketika θ motor mengambang bebas, tegangan terminalnya selama itu hanya menjadi gerak GGL (E). Untuk menyederhanakan Gambar 8.3, diasumsikan bahwa resistansi jangkar bernilai kecil dan penurunan tegangan ($I_a R_a$) yang sesuai dapat diabaikan. Dalam hal ini, tegangan jangkar rata-rata (V_{dc}) harus sama dengan gerak GGL, karena tidak boleh ada tegangan rata-rata melintasi induktansi jangkar ketika tidak ada perubahan bersih dalam arus melalui satu pulsa.

Perbedaan paling penting antara Gambar 8.2 dan Gambar 8.3 adalah bahwa tegangan rata-rata lebih tinggi ketika arus diskontinyu. Dan karenanya kecepatan yang sesuai dengan kondisi pada Gambar 8.3 lebih tinggi daripada di Gambar 8.2 meskipun keduanya memiliki sudut penyalaan yang sama. Dan sementara dalam mode kontinyu kenaikan beban dapat dipenuhi oleh peningkatan arus jangkar tanpa mempengaruhi tegangan (dan karenanya kecepatan), situasinya sangat berbeda ketika arus diskontinyu. Dalam kasus terakhir, satu-satunya cara agar arus rata-rata dapat meningkat adalah ketika kecepatan (dan karenanya E) turun sehingga area yang diarsir pada Gambar 8.3 menjadi lebih besar.

Ini berarti bahwa dari sudut pandang pengguna, perilaku motor dalam mode diskontinyu jauh lebih buruk daripada dalam mode arus kontinyu, karena ketika torsi beban meningkat, ada penurunan kecepatan yang serius. Karenanya, kurva kecepatan-torsi yang dihasilkan, memiliki karakteristik “*droopy*” yang sangat tidak disukai di daerah arus diskontinyu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.4. Dan di samping itu, kerugian I^2R jauh lebih tinggi daripada dengan dc murni.



Gambar 8.4 Kurva kecepatan-torsi menggambarkan karakteristik “*droopy*” yang tidak diinginkan yang terkait dengan arus diskontinyu. Karakteristik yang ditingkatkan (ditunjukkan titik) sesuai dengan operasi dengan arus kontinyu.

Di bawah kondisi beban yang sangat ringan atau tanpa beban, pulsa arus menjadi hampir tidak ada. Daerah yang diarsir pada Gambar 8.3 menjadi sangat kecil dan kecepatan motor mencapai titik di mana GGL balik sama dengan puncak tegangan catu.

Sangat mudah untuk melihat bahwa kurva kecepatan-torsi yang inheren dengan diskontinuitas mendadak dari bentuk yang ditunjukkan pada Gambar 8.4 sangat tidak diinginkan. Jika misalnya sudut penyalaan diatur ke nol dan motor dengan beban penuh, kecepatannya akan menetap pada titik A, tegangan jangkar rata-rata dan arus memiliki nilai penuh (pengenal). Ketika beban berkurang, arus terus menerus kontinu, ada sedikit peningkatan kecepatan yang diharapkan, sampai titik B tercapai. Ini adalah titik di mana arus akan memasuki fasa diskontinyu. Setiap pengurangan lebih lanjut dalam torsi beban kemudian menghasilkan peningkatan kecepatan yang tidak proporsional. Terutama jika beban dikurangi menjadi nol ketika kecepatan mencapai titik C.

Ada dua cara yang digunakan untuk meningkatkan karakteristik yang buruk ini. Pertama, menambahkan induktansi ekstra secara seri dengan jangkar untuk lebih menghaluskan bentuk gelombang arus dan mengurangi kemungkinan arus diskontinyu. Efek penambahan induktansi ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 8.4. Dan kedua, dapat menukar dari konverter fasa tunggal ke konverter 3 fasa yang menghasilkan tegangan dan bentuk gelombang arus yang lebih halus.

Ketika konverter dan motor digabungkan dalam kendali *loop* tertutup, pengguna seharusnya tidak menyadari adanya kekurangan dalam karakteristik motor/konverter yang melekat. Karena sistem kendali secara otomatis mengubah sudut penyalaan untuk mencapai kecepatan target pada semua beban. Sehubungan dengan Gambar 8.4, misalnya, sejauh menyangkut pengguna, sistem kendali akan membatasi operasi ke daerah yang diarsir. Dan fakta bahwa motor secara teoritis mampu berjalan tanpa beban pada kecepatan tinggi yang sesuai dengan titik C hanya untuk kepentingan akademik.

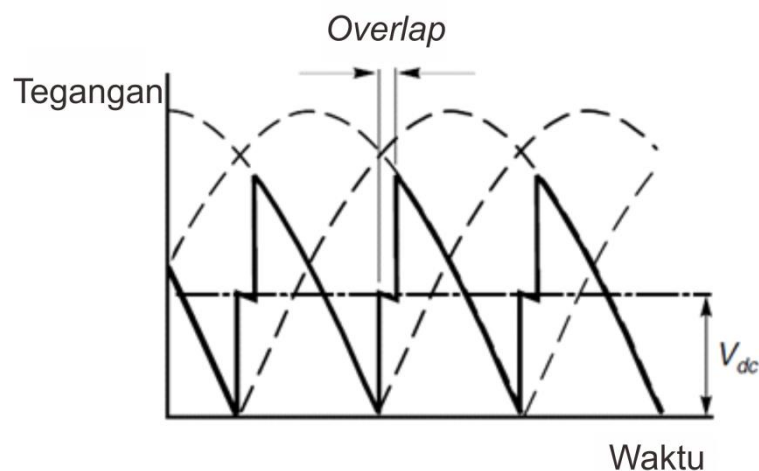
8.4 Impedansi Keluaran Konverter: *Overlap*

Sejauh ini pembahasan secara tidak langsung mengasumsikan bahwa tegangan keluaran dari konverter tidak tergantung pada arus yang ditarik oleh motor, dan hanya bergantung pada sudut tunda α . Dengan kata lain, konverter telah diperlakukan sebagai sumber tegangan ideal.

Dalam praktiknya, catu ac memiliki impedansi yang terbatas, dan oleh karena itu, penurunan tegangan yang tergantung pada arus diharapkan ditarik oleh motor. Mungkin impedansi catu

(yang terutama disebabkan oleh reaktansi kebocoran induktif pada transformator) memanifestasikannya pada tahap keluaran konverter sebagai resistansi catu, sehingga penurunan tegangan (atau regulasi) catu berbanding lurus dengan arus jangkar motor.

Tidak perlu dibahas lebih rinci, tetapi harus dicatat bahwa efek reaktansi induktif catu adalah untuk menunda transfer (atau komutasi) arus antara thyristor, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *overlap*. Konsekuensi dari *overlap* adalah bahwa alih-alih tegangan keluaran membuat lompatan tiba-tiba pada awal setiap pulsa, namun ada periode singkat ketika dua thyristor mengalirkan secara bersamaan. Selama interval ini, tegangan keluaran adalah rata-rata dari pada Gambar 8.5. Penting bagi pengguna untuk menyadari bahwa *overlap* akan terjadi, karena jika tidak, pengguna dapat mengkhawatirkan ketika pertama kali menghubungkan osiloskop ke terminal motor. Ketika kemudi terhubung ke pasokan industri “*stiff*” (yaitu impedansi rendah), *overlap* hanya akan berlangsung selama beberapa mikrodetik, sehingga “*notch*” yang ditunjukkan pada Gambar 8.5 akan nyaris tidak terlihat pada osiloskop. Dalam buku, lebar *overlap* selalu dilebih-lebihkan untuk kejelasan, seperti pada Gambar 8.5. Dengan pasokan 50 atau 60 Hz, jika *overlap* berlangsung lebih dari misal 1 ms, implikasinya adalah bahwa impedansi sistem catu terlalu tinggi untuk ukuran konverter, atau sebaliknya, konverter terlalu besar untuk catu.



Gambar 8.5 Distorsi bentuk gelombang tegangan konverter yang disebabkan oleh penyearah *overlap*.

Kembali ke konsekuensi praktis dari impedansi pasokan, hanya perlu mengizinkan adanya “resistansi sumber” tambahan secara seri dengan tegangan keluaran konverter. Resistansi sumber ini seri dengan resistansi jangkar motor, dan karenanya kurva kecepatan torsi motor untuk setiap nilai α memiliki penurunan yang sedikit lebih curam daripada yang akan terjadi jika impedansi catu nol.

8.5 Operasi Empat Kuadran Dan Inversi

Sejauh ini telah dibahas konverter sebagai penyearah, menyuplai daya dari listrik ac ke mesin dc yang berjalan dalam arah positif dan bertindak sebagai motor. Ini dikenal sebagai satu operasi kuadran, dengan mengacu pada kuadran 1 dari bidang kecepatan torsi lengkap.

Tetapi misalkan mesin ingin dijalankan sebagai motor dalam arah yang berlawanan, dengan kecepatan dan torsi negatif, misal di kuadran 3, bagaimana melakukannya? Dan bagaimana dengan mengoperasikan mesin sebagai generator, sehingga daya dikembalikan ke catu ac, konverter kemudian “membalikkan (*inverting*)” daya dan bukan menyearahkan (*rectifying*), dan sistem yang beroperasi di kuadran 2 atau kuadran 4. Hal ini perlu jika kita ingin mencapai pengereman regeneratif. Apakah mungkin, dan jika ya, bagaimana?

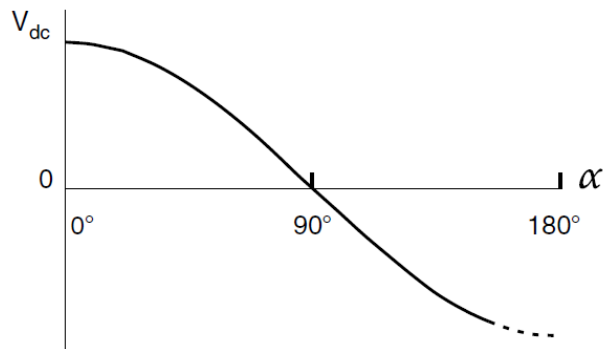
Berita baiknya adalah mesin dc pada dasarnya adalah konverter energi dua arah. Jika menerapkan tegangan positif V lebih besar dari E , arus mengalir ke jangkar dan mesin berjalan sebagai motor. Jika mengurangi V sehingga kurang dari E , maka arus, torsi dan daya secara otomatis membalikkan arah, dan mesin bertindak sebagai generator, mengubah energi mekanik (energi kinetik sendiri dalam hal pengereman regeneratif) menjadi energi listrik. Dan jika menginginkan pada motor atau menghasilkan dengan arah rotasi terbalik, yang harus dilakukan adalah membalik polaritas catu jangkar. Mesin dc adalah secara inheren perangkat empat kuadran tetapi membutuhkan catu yang dapat memberikan tegangan positif atau negatif, dan secara bersamaan menangani arus positif atau negatif.

Di sinilah mulai dihadapkan dengan rintangan, konverter thyristor tunggal hanya dapat menangani arus dalam satu arah karena thyristor adalah perangkat searah. Ini tidak berarti bahwa konverter tidak mampu mengembalikan daya ke catu. Arus dc hanya bisa positif, tetapi (asalkan konverter terkendali penuh) tegangan keluaran dc dapat berupa positif atau negatif. Aliran daya dapat menjadi positif (*rectification*) atau negatif (*inversion*).

Untuk motor normal di mana tegangan keluaran positif (dan dengan asumsi konverter terkendali penuh), sudut tunda (α) akan mencapai 90° . (Ini adalah praktik umum untuk sudut penyalaan yang sesuai dengan tegangan dc pengenalan sekitar 20° ketika tegangan ac yang masuk adalah normal. Jika tegangan ac turun karena alasan apa pun, sudut penyalaan selanjutnya dapat dikurangi untuk mengimbangi dan membiarkan tegangan dc penuh dipertahankan.)

Ketika α lebih besar dari 90° , bagaimanapun juga, tegangan keluaran negatif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.6. Konverter tunggal terkendali penuh, memiliki potensi untuk operasi dua kuadran. Meskipun harus diakui bahwa kemampuan ini tidak mudah dieksploitasi

kecuali menggunakan sakelar pembalik di rangkaian jangkar atau medan. Pembahasan ini akan dijabarkan selanjutnya.

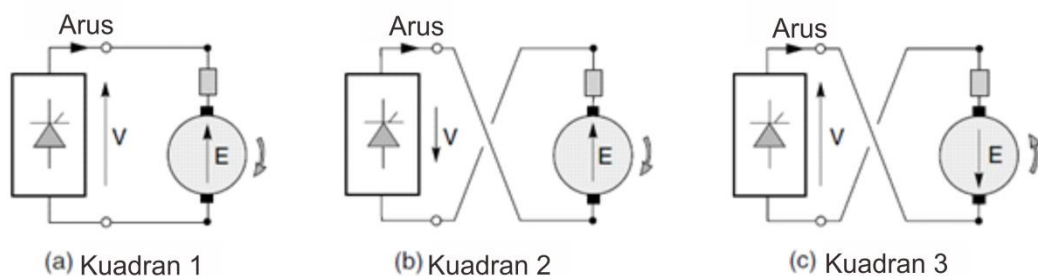


Gambar 8.6. Tegangan keluaran dc rata-rata dari konverter thyristor terkendali penuh sebagai fungsi dari penundaan sudut penyalaan α .

8.6 Kemudi Pembalik Konverter Tunggal

Konverter terkendali penuh akan dipertimbangkan untuk memasok motor magnet permanen, dan melihat bagaimana motor dapat direm secara regeneratif dari kecepatan penuh dalam satu arah, dan kemudian dipercepat hingga kecepatan penuh secara terbalik. Akan terlihat prosedur ini pada prinsipnya, tetapi di sini akan dieksplorasi praktis untuk mencapainya dengan kemudi yang diumpangkan ke konverter. Harus jelas sejak awal bahwa dalam praktiknya, yang harus dilakukan pengguna adalah mengubah sinyal referensi kecepatan dari maju penuh ke mundur penuh. Sistem kendali di konverter kemudi menangani masalah sejak saat itu. Apa yang dilakukannya, dan bagaimana, dibahas di bawah ini.

Ketika motor berjalan dengan kecepatan penuh ke depan, sudut penundaan konverter akan kecil, dan tegangan keluaran konverter V dan arus I keduanya akan positif. Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 8.7(a), dan sesuai dengan operasi di kuadran 1.



Gambar 8.7 Tahapan pembalikan motor menggunakan kemudi konverter tunggal dan sakelar pembalikan mekanis.

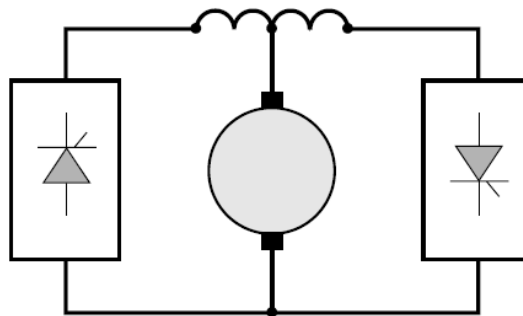
Untuk mengerem motor, torsi harus dibalik. Satu-satunya cara ini dapat dilakukan adalah dengan membalik arah arus jangkar. Konverter hanya dapat memasok arus positif, sehingga untuk membalikkan torsi motor, maka harus membalikkan koneksi jangkar menggunakan sakelar mekanis atau kontaktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.7(b). (Sebelum mengoperasikan kontaktor, arus jangkar akan dikurangi menjadi nol dengan menurunkan tegangan konverter, sehingga kontaktor tidak diharuskan untuk menghentikan arus.) Perhatikan bahwa karena motor masih berputar ke arah positif, GGL balik tetap dalam nilai aslinya. Tetapi sekarang gerak GGL terlihat menyumbang arus dan untuk menjaga arus dalam batas, konverter harus menghasilkan tegangan V negatif yang hanya sedikit rendah dari E . Ini dicapai dengan mengatur sudut tunda pada titik yang tepat antara 90° dan 180° . (Garis putus-putus pada Gambar 8.6 menunjukkan bahwa tegangan negatif maksimum yang dapat diterima secara umum akan sedikit lebih rendah daripada tegangan positif maksimum. Pembatasan ini timbul karena kebutuhan untuk mempertahankan margin untuk komutasi arus antar thyristor.) Perhatikan bahwa arus konverter masih positif (yaitu ke atas pada Gambar 8.7(b)), tetapi tegangan konverter negatif, dan dengan demikian, daya kembali ke sumber listrik. Dalam kondisi ini, sistem beroperasi di kuadran 2, dan motor melambat karena torsi negatif. Saat kecepatan turun, E berkurang, dan karenanya V harus dikurangi secara bertahap untuk menjaga arus pada nilai penuh. Ini dicapai secara otomatis oleh aksi dari *loop* kendali arus yang akan didiskusikan nanti.

Arus (torsi) harus dijaga negatif agar dapat berjalan dengan kecepatan ke arah sebaliknya, tetapi setelah GGL balik berubah tanda (saat motor berbalik), tegangan konverter kembali menjadi positif dan lebih besar dari E , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.7(c). Konverter kemudian menyearahkan, dengan daya dimasukkan ke motor, dan sistem beroperasi di kuadran 3. Skema yang menggunakan kontaktor pembalik tidak cocok di mana waktu pembalikan sangat penting, karena tunda waktu yang disebabkan oleh sakelar pembalik mekanis mungkin hingga 200-400 msec. Skema pembalikan medan beroperasi dengan cara yang serupa tetapi membalikkan arus medan, bukan arus jangkar. Bahkan lebih lambat, karena waktu relatif konstan dari medan belitan.

8.7 Kemudi Pembalik Konverter Ganda

Di mana operasi empat kuadran penuh dan pembalikan cepat diperlukan, dua konverter yang terhubung dalam anti-paralel digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.8. Satu konverter memasok arus positif ke motor, sedangkan konverter lain memasok arus negatif.

Jembatan dioperasikan sehingga tegangan dc-nya hampir sama, sehingga memastikan bahwa setiap arus dc yang bersirkulasi kecil. Dan reaktor ditempatkan di antara jembatan untuk membatasi aliran arus riak yang dihasilkan dari tegangan riak yang tidak sama dari kedua konverter. Atau, reaktor dapat disalurkan dengan hanya mengoperasikan satu konverter pada satu waktu. Pergantian dari satu konverter ke konverter lainnya hanya dapat terjadi setelah pulsa penyalaan telah dihilangkan dari satu konverter, dan arus jangkar telah menjadi nol. Rangkaian deteksi arus nol yang sesuai disediakan sebagai bagian integral dari kemudi sehingga, sejauh menyangkut pengguna, kedua konverter berperilaku seolah-olah adalah sumber dc dua arah ideal tunggal.

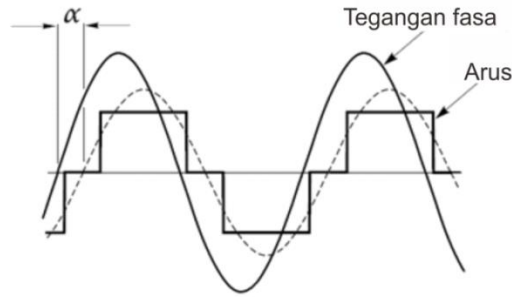


Gambar 8.8 Kemudi pembalik konverter ganda.

Calon pengguna perlu menyadari fakta bahwa konverter tunggal dasar hanya dapat menyediakan untuk operasi di satu kuadran. Jika pengereman regeneratif diperlukan, kontaktor pembalik medan atau jangkar akan diperlukan. Dan jika pembalikan cepat sangat menjadi hal penting, konverter ganda harus digunakan. Semua tambahan ini tentu saja akan meningkatkan harga pembelian.

8.8 Faktor Daya Dan Efek Catu

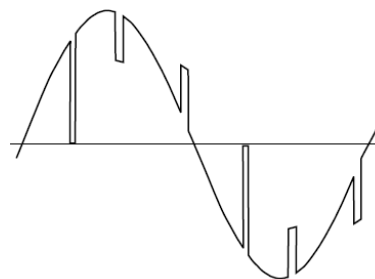
Salah satu kelemahan dari kemudi dc yang diumpankan ke konverter adalah bahwa faktor daya catu sangat rendah ketika motor beroperasi pada torsi tinggi (yaitu arus tinggi) dan kecepatan rendah (yaitu tegangan jangkar rendah), dan kurang dari satu kesatuan bahkan pada kecepatan dasar dan beban penuh. Ini karena bentuk gelombang catu tertinggal dari bentuk gelombang tegangan catu oleh sudut tunda, seperti yang ditunjukkan (untuk konverter 3 fasa) pada Gambar 8.9, dan juga arus catu agak persegi (bukan sinusoidal).



Gambar 8.9 Tegangan catu dan bentuk gelombang arus pada kemudi motor dc konverter fasa tunggal.

Penting untuk menekankan bahwa faktor daya catu selalu tertinggal, bahkan ketika konverter membalik. Tidak ada cara untuk menghindari faktor daya rendah, sehingga pengguna yang menggunakan kemudi besar perlu bersiap untuk menambah peralatan koreksi faktor daya yang ada jika perlu. Harmonik dalam bentuk arus utama dapat menimbulkan berbagai masalah interferensi, dan otoritas pemasok pada umumnya memberlakukan batas-batas hukum. Untuk kemudi besar (misal ratusan kilowatt), tapis mungkin harus disediakan untuk mencegah batas ini terlampaui.

Karena impedansi catu tidak pernah nol, maka ada juga distorsi tak terhindarkan dari bentuk gelombang tegangan listrik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.10 yang menunjukkan efek konverter 6-pulsa pada bentuk gelombang tegangan jalur ke jalur (*line-to-line*). *Spikes* dan *notches* muncul karena hantaran listrik sesaat mengalami hubung singkat setiap kali arus berganti dari satu thyristor ke yang berikutnya, yaitu selama periode *overlap* yang dibahas sebelumnya. Untuk sebagian besar kemudi kecil dan menengah, yang terhubung dengan pasokan industri *stiff*, *notches* ini terlalu kecil untuk diperhatikan (*notches* dibesarkan demi kejelasan dalam Gambar 8.10). Tetapi *notches* dapat menimbulkan masalah gangguan serius bagi konsumen lain ketika kemudi besar terhubung ke pasokan yang lemah.



Gambar 8.10 Distorsi bentuk gelombang tegangan yang disebabkan oleh *overlap* dalam konverter tiga fasa terkendali penuh. (Lebar *notches* dilebihkan demi kejelasan.)

9. PENGATURAN PENGENDALIAN UNTUK KEMUDI DC

Pengaturan yang paling umum, yang hanya digunakan dengan variasi kecil dari kemudi kecil, misal 0,5 kW hingga kemudi industri terbesar dari beberapa megawatt, adalah apa yang disebut kendali dua putaran. Ini memiliki *loop* umpan balik dalam (*inner feedback loop*) untuk mengontrol arus (dan torsi) dan *loop* luar (*outer loop*) untuk mengontrol kecepatan. Ketika kendali posisi diperlukan, *loop* posisi luar lebih lanjut ditambahkan. Skema dua putaran untuk kemudi dc thyristor dibahas terlebih dahulu, tetapi fitur-fitur penting adalah sama dalam kemudi yang diumpankan *chopper*. Kemudian pengaturan yang lebih sederhana yang digunakan dalam kemudi kecil berbiaya rendah juga akan dibahas.

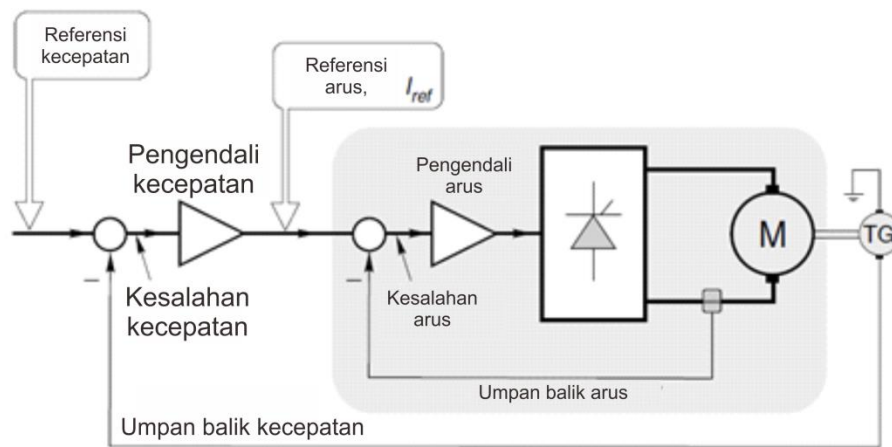
Diskusi didasarkan pada kendali analog, dan sejauh mungkin terbatas pada aspek-aspek yang perlu diketahui dan dipahami pengguna. Dalam praktiknya, setelah kemudi ditugaskan, hanya ada beberapa penyesuaian potensiometer (atau preset dalam hal kendali digital) yang dapat diakses oleh pengguna. Sementara sebagian besarnya cukup jelas (misalnya kecepatan maksimal, kecepatan minimal, akselerasi dan deselerasi). Beberapa di antaranya kurang jelas (misalnya “stabilitas arus”, “stabilitas kecepatan”). Jadi ini akan dijelaskan.

Untuk menilai operasi keseluruhan skema dua putaran, mak dapat mempertimbangkan apa yang akan dilakukan jika mengendalikan motor secara manual. Sebagai contoh, jika menemukan dengan mengamati tacho generator bahwa kecepatan di bawah target, kemudian ingin memberikan lebih banyak arus (dan torsi) untuk menghasilkan akselerasi, maka selanjutnya menaikkan tegangan jangkar. Hal ini harus dilakukan dengan hati-hati, bagaimanapun juga, dengan memperhatikan bahaya menciptakan arus berlebih karena keseimbangan halus yang ada antara GGL balik, E dan tegangan, V yang diberikan. Ammeter pasti ingin selalu agar tetap diawasi setiap saat untuk menghindari meledakkan tumpukan thyristor. Dan ketika kecepatan mendekati target, arus akan dipangkas kembali (dengan menurunkan tegangan yang diberikan) untuk menghindari *overshooting* kecepatan yang ditetapkan. Tindakan semacam ini dilakukan secara otomatis oleh sistem kemudi, yang sekarang akan dieksplorasi.

Sistem kemudi dc standar dengan kendali kecepatan dan arus ditunjukkan pada Gambar 9.1. Tujuan utama dari sistem kendali adalah untuk memberikan kendali kecepatan, sehingga “masukan” ke sistem adalah sinyal referensi kecepatan di sebelah kiri pada gambar, dan keluarannya adalah kecepatan motor (yang diukur oleh tachogenerator TG) di sebelah kanan pada gambar. Seperti halnya sistem *loop* tertutup, kinerja keseluruhan sangat bergantung pada kualitas sinyal umpan balik, dalam hal ini tegangan proporsional kecepatan yang disediakan oleh tachogenerator. Oleh karena itu penting untuk memastikan bahwa tacho memiliki kualitas yang

tinggi (sehingga tegangan keluarannya tidak bervariasi dengan suhu sekitar, dan bebas riak) dan sebagai akibatnya biaya tachometer sering mendominasi sebagian besar dari total biaya.

Skema pertama akan dipelajari kemudian memeriksa fungsi dari dua loop secara lebih rinci. Untuk mendapatkan gambaran tentang pengoperasian sistem, akan dipertimbangkan apa yang akan terjadi jika, dengan motor berjalan ringan pada kecepatan yang ditetapkan, sinyal referensi kecepatan tiba-tiba meningkat. Karena kecepatan set (referensi) sekarang lebih besar dari kecepatan actual, maka akan ada sinyal kesalahan kecepatan (*speed error*) seperti pada Gambar 1.3 0, diwakili oleh keluaran dari persimpangan penjumlahan (*summing junction*) sebelah kiri pada Gambar 9.1. Kesalahan kecepatan menunjukkan bahwa akselerasi diperlukan, yang pada gilirannya juga torsi, yaitu lebih banyak arus. Kesalahan kecepatan diperkuat oleh pengontrol kecepatan (yang lebih akurat digambarkan sebagai penguat kesalahan-kecepatan) dan keluaran berfungsi sebagai referensi atau sinyal masukan ke sistem kendali bagian dalam. *Loop* umpan balik dalam adalah *loop* kendali arus. Jadi ketika referensi arus meningkat, maka begitu juga arus jangkar motor, dengan demikian memberikan torsi tambahan dan memulai akselerasi. Ketika kecepatan naik, kesalahan kecepatan berkurang, dan oleh karena itu arus dan torsi berkurang untuk mendapatkan pendekatan yang halus terhadap kecepatan target.



Gambar 9.1 Diagram skematis kemudi kendali kecepatan analog dengan *loop* kendali umpan balik arus dan kecepatan.

Sekarang akan dilihat lebih detail pada *loop* dalam (kendali arus), karena operasi yang benar sangat penting untuk memastikan bahwa thyristor dilindungi terhadap arus berlebih.

9.1 Kendali Arus

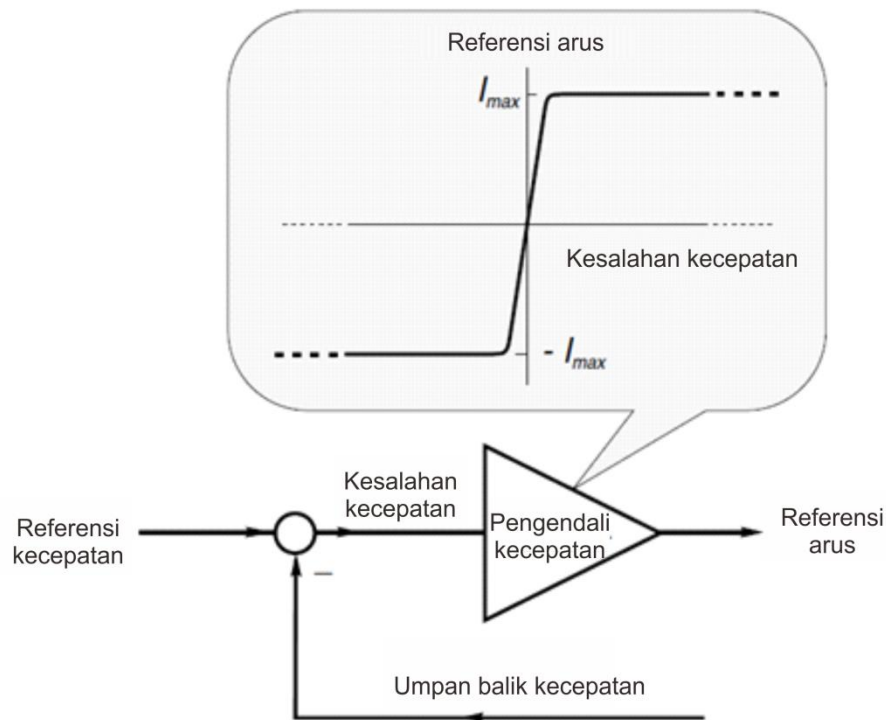
Pengontrol arus tertutup, atau *loop* arus, adalah jantung dari sistem kemudi dan ditunjukkan oleh daerah yang diarsir pada Gambar 9.1. Tujuan dari *loop* arus adalah untuk membuat arus motor aktual mengikuti sinyal referensi saat ini (I_{ref}) yang ditunjukkan pada Gambar 9.1. Hal ini dilakukan dengan membandingkan sinyal umpan balik dari arus motor aktual dengan sinyal referensi arus, memperkuat perbedaan (atau kesalahan arus), dan menggunakan sinyal kesalahan arus yang diperkuat yang dihasilkan (tegangan analog) untuk mengontrol sudut tembak α - dan karenanya tegangan keluaran - dari konverter. Sinyal umpan balik arus diperoleh baik dari trafo arus dc (yang memberikan keluaran tegangan analog yang terisolasi), atau dari trafo/penyearah arus ac di jalur catu utama.

Pekerjaan membandingkan referensi (permintaan) dan sinyal aktual aktual dan memperkuat sinyal kesalahan dilakukan oleh penguat kesalahan arus (*current-error*). Dengan memberikan penguat kesalahan arus dengan gain yang tinggi, arus motor aktual akan selalu sesuai dengan sinyal referensi arus, yaitu kesalahan arus akan kecil terlepas dari kecepatan motor. Dengan kata lain, arus motor aktual dapat diharapkan untuk mengikuti sinyal “referensi arus” setiap saat, tegangan jangkar secara otomatis disesuaikan oleh pengontrol sehingga, terlepas dari kecepatan motor, arus memiliki nilai yang benar.

Tentu saja tidak ada sistem kendali yang sempurna, namun biasanya penguat kesalahan arus adalah tipe proporsional plus integral (PI), dalam hal ini arus actual dan permintaan akan sama persis dalam kondisi keadaan tunak.

Pentingnya mencegah arus konverter yang berlebihan dari aliran telah ditekankan sebelumnya, dan *loop* kendali arus menyediakan sarana untuk tujuan ini. Selama *loop* kendali arus berfungsi dengan baik, arus motor tidak akan pernah bisa melebihi nilai referensi. Oleh karena itu dengan membatasi besarnya sinyal referensi arus (melalui rangkaian *clamping*), arus motor tidak pernah dapat melebihi nilai yang ditentukan. Ini ditunjukkan pada Gambar 9.2, yang mewakili sebagian kecil dari Gambar 9.1. Karakteristik dari pengontrol kecepatan diperlihatkan dalam panel berarsir, dari mana dapat dilihat bahwa untuk kesalahan kecil dalam kecepatan, referensi arus meningkat sebanding dengan kecepatan, dengan demikian memastikan perilaku “sistem linear” dengan pendekatan yang halus ke kecepatan target. Namun, setelah kesalahan kecepatan melebihi batas, keluaran dari penguat kesalahan kecepatan menjadi jenuh (saturasi) dan dengan demikian tidak ada peningkatan lebih lanjut dalam referensi arus. Dengan mengatur referensi arus maksimum ini agar sesuai dengan arus penuh (terukur) dari sistem, tidak ada kemungkinan arus pada motor dan konverter melebihi nilai pengenalnya, tidak peduli seberapa besar kesalahan kecepatan itu.

“Pembatasan arus elektronik” tersebut sejauh ini merupakan fitur pelindung terpenting dari setiap kemudi. Ini berarti bahwa jika misalnya motor tiba-tiba berhenti karena beban menyambar (sehingga GGL balik turun secara dramatis), tegangan jangkar akan secara otomatis berkurang ke nilai yang sangat rendah, sehingga membatasi arus ke tingkat maksimum yang diijinkan.



Gambar 9.2 Detail menunjukkan karakteristik penguat kesalahan kecepatan.

Hal terburuk yang harus dituju saat mengatur kemudi adalah *loop* arus yang baik. Dalam konteks ini, “baik” berarti bahwa arus motor kondisi keadaan tunak harus sesuai persis dengan referensi arus, dan respons transien terhadap perubahan langkah dalam referensi arus harus cepat dan teredam dengan baik. Yang pertama dari persyaratan ini dipenuhi oleh istilah integral dalam penguat kesalahan arus, sedangkan yang kedua diperoleh dengan pilihan yang tepat dari gain proporsional amplifier dan waktu konstan. Sejauh menyangkut pengguna, penyesuaian “stabilitas arus” disediakan untuk memungkinkannya mengoptimalkan respons transien dari *loop* arus.

Pada titik jargon, mungkin sering disebutkan penguat kesalahan arus daripada disebut “pengontrol arus” (seperti pada Gambar 9.1) atau “penguat arus”. Yang pertama dari istilah-istilah ini cukup masuk akal, tetapi yang kedua bisa sangat menyesatkan: sama sekali tidak ada pertanyaan tentang arus motor itu sendiri sedang diperkuat.

9.2 Kendali Torsi

Pada aplikasi yang membutuhkan motor untuk beroperasi dengan torsi yang ditentukan terlepas dari kecepatan, maka dapat membuang *loop* luar (kecepatan), dan cukup memberi sinyal referensi arus langsung ke pengontrol arus (biasanya melalui torsi “terminal ref” pada papan kendali). Ini karena torsi berbanding lurus dengan arus, sehingga pengontrol arus juga pengontrol torsi. Mungkin harus membuat kelonggaran untuk mempercepat torsi melalui sinyal “kompensasi inersia” transien, tetapi ini biasanya disediakan melalui penyesuaian potensiometer atau preset digital.

Dalam mode kendali arus, arus tetap konstan pada nilai yang ditetapkan, dan kecepatan berjalan stabil ditentukan oleh beban. Jika sinyal referensi torsi diatur pada 50%, misalnya, dan motor pada awalnya diam, maka akan berakselerasi dengan arus konstan setengah nilai pengenalan hingga torsi beban sama dengan torsi motor. Tentu saja, jika motor berjalan tanpa beban apa pun, maka akan berakselerasi dengan cepat, tegangan yang diberikan naik sehingga selalu tetap lebih tinggi daripada GGL balik dengan jumlah yang diperlukan untuk menggerakkan arus yang ditentukan ke dalam jangkar. Akhirnya motor akan mencapai kecepatan (sedikit di atas kecepatan penuh normal) di mana tegangan keluaran konverter telah mencapai batas atas. Dan karena itu tidak mungkin lagi untuk mempertahankan arus yang diatur, setelah itu, kecepatan motor akan tetap stabil.

9.3 Kendali Kecepatan

Lingkaran luar pada Gambar 9.1 menyediakan kendali kecepatan. Umpan balik kecepatan disediakan oleh tachogenerator dc dan kecepatan aktual dan yang diperlukan dimasukkan ke dalam penguat kesalahan kecepatan (sering dikenal hanya sebagai penguat kecepatan atau pengontrol kecepatan).

Perbedaan apa pun antara kecepatan aktual dan yang diinginkan diperkuat, dan keluaran berfungsi sebagai masukan ke *loop* arus. Oleh karena itu jika misalnya kecepatan motor aktual kurang dari kecepatan yang diinginkan, penguat kecepatan akan memaksa arus sebanding dengan kesalahan kecepatan, dan karena itu motor akan mempercepat untuk meminimalkan kesalahan kecepatan.

Ketika beban meningkat, ada perlambatan langsung dan sinyal kesalahan kecepatan meningkat, sehingga memanggil *loop* dalam untuk menambah banyak arus. Peningkatan torsi menghasilkan akselerasi dan pengurangan kesalahan kecepatan secara progresif sampai tercapai

keseimbangan pada titik di mana referensi arus (I_{ref}) menghasilkan arus motor yang memberikan torsi yang sama dan berlawanan dengan torsi beban. Pada Gambar 9.2, di mana pengontrol kecepatan ditampilkan sebagai penguat proporsional sederhana (kendali P), akan mudah dinilai bahwa agar ada nilai keadaan tunak I_{ref} , maka harus ada batas kesalahan kecepatan. Yaitu pengontrol P tidak memungkinkan untuk mencapai kecepatan target dengan tepat. (Nilai ideal dapat didekati dengan meningkatkan penguatan amplifier, tetapi mungkin membawa pada ketidakstabilan.)

Untuk menghilangkan kesalahan kecepatan keadaan tunak, dapat dengan mudah mengatur agar pengontrol kecepatan memiliki istilah integral (I) dan juga proporsional (P) (lihat Lampiran). Pengontrol PI dapat memiliki keluaran yang terbatas bahkan ketika masukannya nol, yang berarti bahwa dapat mencapai kesalahan keadaan tunak nol jika kita menggunakan kendali PI.

Kecepatan akan ditahan pada nilai yang ditetapkan oleh sinyal referensi kecepatan untuk semua beban sampai ke titik di mana arus amper penuh diperlukan. Jika torsi beban meningkat lagi, kecepatan akan turun karena *loop* arus tidak akan membiarkan arus jangkar mengalir. Sebaliknya, jika beban berusaha memaksa kecepatan di atas nilai yang ditetapkan, arus motor akan dibalik secara otomatis, sehingga motor bertindak sebagai rem dan meregenerasi daya ke sumber listrik.

Untuk menekankan lebih jauh peran perlindungan yang sangat penting dari *loop* dalam, dapat dilihat apa yang terjadi ketika dengan motor dalam keadaan diam (dan dibongkar demi kesederhanaan), referensi kecepatan ditingkatkan secara tiba-tiba dari nol hingga nilai penuh, yaitu dengan menerapkan permintaan langkah untuk kecepatan penuh. Kesalahan kecepatan akan 100%, sehingga keluaran (I_{ref}) dari penguat kesalahan kecepatan akan segera saturasi pada nilai maksimumnya, yang telah sengaja di-*clamp* agar sesuai dengan permintaan untuk arus maksimum (pengenal) di motor. Sehingga, arus motor akan berada pada nilai nominal, dan motor akan berakselerasi pada torsi penuh. Oleh karena itu, kecepatan dan GGL balik (E) akan naik pada laju konstan, tegangan (V) yang diterapkan meningkat terus sehingga perbedaan ($V-E$) cukup untuk menggerakkan arus pengenal (I) melalui resistansi jangkar. Dalam beberapa kemudi, referensi arus diperbolehkan mencapai 150% atau bahkan 200% dari nilai pengenal selama beberapa detik, untuk memberikan dorongan torsi pendek. Ini sangat berharga dalam memulai beban dengan gesekan statis tinggi, dan dikenal sebagai "batas arus dua tahap (*two-stage current limit*)".

Keluaran dari penguat kecepatan akan tetap saturasi sampai kecepatan aktual cukup dekat dengan kecepatan target, dan untuk waktu ini arus motor akan ditahan pada nilai penuh. Hanya

ketika kecepatan berada dalam beberapa persen dari target, penguat kesalahan kecepatan akan keluar dari saturasi. Setelah itu, ketika kecepatan terus meningkat, dan kesalahan kecepatan turun, keluaran dari penguat kesalahan kecepatan turun di bawah level yang di-*clamp*. Kendali kecepatan kemudian memasuki linier, di mana arus koreksi (dan torsi) sebanding dengan kesalahan kecepatan, sehingga memberikan pendekatan yang halus untuk kecepatan akhir.

Pengontrol kecepatan “baik” akan menghasilkan nol kesalahan kondisi keadaan tunak dan memiliki respons yang baik terhadap langkah perubahan dalam kecepatan yang diminta. Istilah integral dalam kendali PI melayani kebutuhan nol kesalahan kondisi keadaan tunak, sedangkan respons sementara tergantung pada pengaturan gain proporsional dan konstanta waktu. Potensiomete “kestabilan kecepatan” disediakan untuk memungkinkan pengguna mengoptimalkan respons kecepatan transien.

Perlu dicatat bahwa pada umumnya jauh lebih mudah untuk memperoleh respons transien yang baik dengan penggerak regeneratif, yang memiliki kemampuan untuk memasok arus negatif (misal torsi pengereman) jika motor melampaui kecepatan yang diinginkan. Penggerak non-regeneratif tidak dapat menghasilkan arus negatif (kecuali jika dipasang dengan kontaktor pembalik), jadi jika kecepatan melampaui target yang terbaik yang dapat dilakukan adalah mengurangi arus jangkar ke nol dan menunggu motor melambat secara alami. Ini tidak memuaskan, dan oleh karena itu, setiap upaya harus dilakukan untuk menghindari pengaturan pengontrol yang mengarah pada *overshoot* dari kecepatan target.

Seperti halnya skema *loop* tertutup, masalah terjadi jika sinyal umpan balik hilang ketika sistem beroperasi. Jika umpan balik tacho menjadi terputus, penguat kecepatan akan segera saturasi, menyebabkan torsi penuh diterapkan. Kecepatan kemudian akan naik sampai keluaran konverter mencapai tegangan keluaran maksimum. Untuk mencegah hal ini, banyak kemudi yang menggabungkan sirkuit deteksi kerugian tacho, dan dalam beberapa kasus, umpan balik tegangan jangkar secara otomatis mengambil alih jika terjadi kegagalan tacho.

Kemudi yang menggunakan pelemahan medan untuk memperpanjang rentang kecepatan mencakup penyediaan otomatis untuk mengendalikan tegangan jangkar dan arus medan saat berjalan di atas kecepatan dasar. Biasanya, arus medan dijaga pada nilai penuh sampai tegangan jangkar mencapai sekitar 95% dari nilai pengenal. Ketika kecepatan yang lebih tinggi dituntut, tegangan jangkar ekstra yang diterapkan disertai dengan pengurangan simultan dalam arus medan, sedemikian rupa sehingga ketika tegangan jangkar mencapai 100% arus medan berada pada nilai aman minimum. Proses ini dikenal sebagai “pelemahan bidang *spillover*”.

9.4 Daerah Operasi Keseluruhan

Kemudi standar dengan pelemahan medan menyediakan kendali tegangan jangkar kecepatan naik hingga kecepatan basis, dan kendali kecepatan pelemahan medan setelahnya. Torsi berapa pun hingga nilai pengenal dapat diperoleh pada kecepatan berapa pun di bawah kecepatan dasar, daerah ini dikenal sebagai daerah “torsi konstan”. Di atas kecepatan dasar, torsi maksimum yang tersedia berkurang berbanding terbalik dengan kecepatan, jadi ini dikenal sebagai daerah “daya konstan”. Untuk kemudi yang diumpankan konverter, daerah pengoperasian dalam kuadran 1 dari bidang putaran torsi ditunjukkan oleh Gambar 8.10. Jika kemudi dilengkapi untuk operasi regeneratif dan pembalikan, area operasi dicerminkan di tiga kuadran lainnya.

9.5 Umpan Balik Tegangan Jangkar Dan Kompensasi *IR*

Pada kemudi berdaya rendah di mana penahan kecepatan presisi tidak penting, dan biaya harus dijaga agar tetap minimum, tachogenerator dihilangkan dan tegangan jangkar digunakan sebagai “umpan balik kecepatan” sebagai gantinya. Performa jelas tidak sebaik umpan balik tacho, karena sementara kecepatan tanpa kondisi keadaan tunak sebanding dengan tegangan jangkar, kecepatan turun ketika beban (dan karenanya arus jangkar) meningkat.

Penurunan kecepatan dengan beban disebabkan oleh penurunan tegangan (*IR*) resistensi jangkar, dan oleh karena itu penurunan kecepatan dapat dikompensasi dengan meningkatkan tegangan yang diterapkan secara proporsional dengan arus. Penyesuaian berlabel “*comp IR*” atau hanya “*IR*” disediakan pada rangkaian kemudi untuk disesuaikan dengan pengguna agar sesuai dengan motor tertentu. Kompensasi biasanya jauh dari sempurna karena tidak dapat mengatasi variasi suhu resistansi, atau dengan efek reaksi jangkar, tetapi lebih baik daripada tidak sama sekali.

9.6 Kemudi Tanpa Kendali Arus

Kemudi yang lebih murah sering mengeluarkan *loop* kendali arus penuh dan menggabungkan “batas arus (*current-limit*)” yang mentah tetapi efektif, yang hanya beroperasi ketika arus disetel maksimum jika tidak akan terlampaui. Kemudi ini biasanya memiliki sirkuit *ramp* bawaan yang membatasi laju kenaikan sinyal kecepatan yang disetel sehingga dalam kondisi normal batas arus tidak diaktifkan.

10. KEMUDI MOTOR Dc DIUMPANKAN CHOPPER

Jika sumber pasokannya adalah dc (misalnya dalam kendaraan baterai atau sistem transit cepat) biasanya digunakan konverter tipe *chopper*. Pada operasi dasar *chopper* saklar tunggal, tegangan keluaran rata-rata dapat bervariasi dengan secara berkala menyalakan dan mematikan tegangan baterai untuk interval yang bervariasi. Perbedaan utama antara penyearah yang dikendalikan thyristor dan *chopper* adalah bahwa pada dengan thyristor, arus motor selalu mengalir melalui catu, sedangkan pada dengan *chopper*, arus motor hanya mengalir dari terminal catu untuk bagian dari setiap siklus.

Chopper sakelar tunggal yang menggunakan transistor, MOSFET atau IGBT hanya dapat mencatu tegangan dan arus positif ke motor dc, dan karenanya dibatasi untuk operasi motor kuadran 1. Ketika diperlukan regeneratif dan/atau pembalikan kecepatan cepat, maka diperlukan rangkaian yang lebih kompleks yang melibatkan dua atau lebih sakelar daya, dan akibatnya mengarah pada peningkatan biaya. Banyak rangkaian yang berbeda digunakan dan tidak mungkin untuk menjelaskan lebih lanjut, meskipun harus disebutkan bahwa rangkaian *chopper* yang hanya menyediakan tegangan keluaran dalam kisaran $0 < E$, di mana E adalah tegangan baterai, jadi tipe *chopper* ini hanya cocok jika tegangan motor kurang dari tegangan baterai. Di mana tegangan motor lebih besar dari tegangan baterai, *chopper* "step-up" menggunakan induktansi tambahan sebagai penyimpan energi perantara digunakan.

10.1 Performa Kemudi Motor Diumpankan Chopper

Telah dilihat sebelumnya bahwa motor dc berkinerja sama baiknya ketika diumpankan dari penyearah fasa-terkendali seperti halnya ketika dicatu dengan dc murni. Motor diumpankan *chopper*, jika ada, lebih baik daripada fasa-terkendali karena riak arus jangkar bisa lebih sedikit jika frekuensi cacah tinggi digunakan.

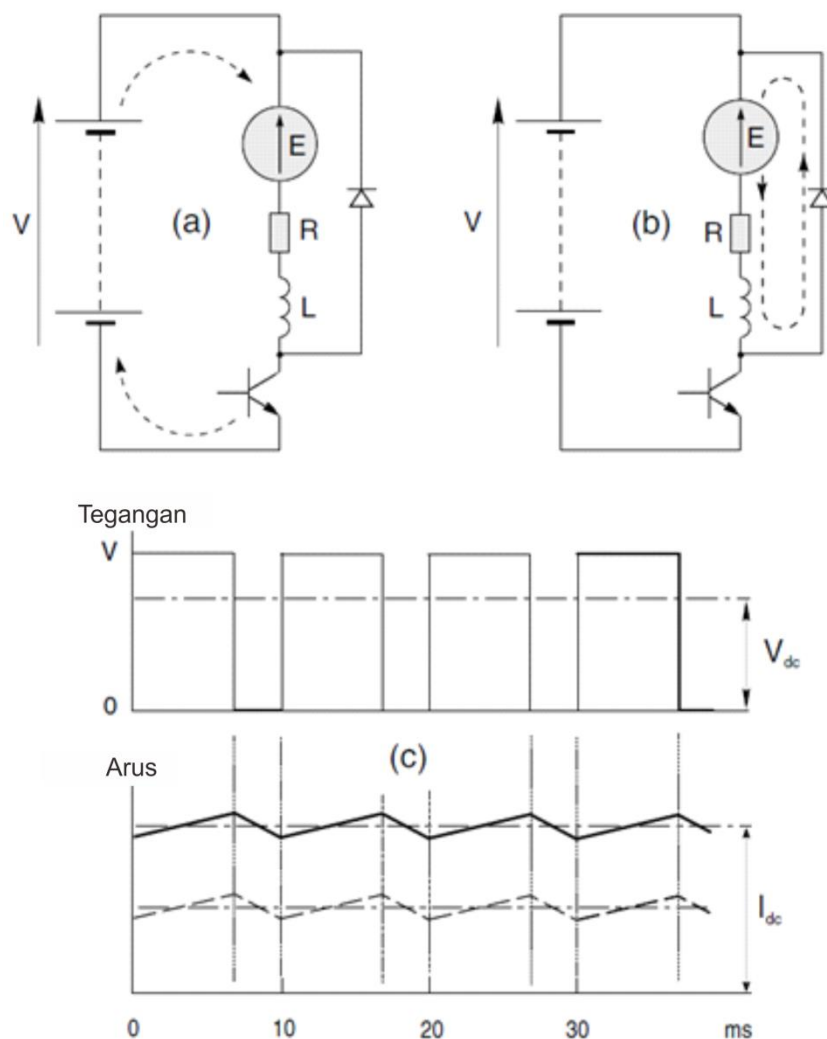
Bentuk gelombang khas dari tegangan dan arus jangkar ditunjukkan pada Gambar 10.1(c), digambarkan dengan asumsi bahwa saklar itu ideal. Frekuensi pemotongan (*chopping frequency*) sekitar 100 Hz, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.1, adalah tipikal dari kemudi *chopper* sedang dan besar, sementara kemudi kecil sering menggunakan frekuensi potong yang jauh lebih tinggi, dan dengan demikian memiliki arus riak yang lebih rendah. Seperti biasa, kecepatan diasumsikan tetap konstan meskipun torsi sedikit berdenyut dan arus jangkar kontinyu.

Bentuk gelombang tegangan jangkar mengingatkan kembali bahwa ketika transistor dihidupkan, tegangan baterai V diterapkan langsung ke jangkar, dan selama periode ini jalur arus jangkar ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 10.1(a). Selama sisa siklus, transistor “dimatikan” dan arus *freewheel* melalui dioda, seperti yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 10.1(b). Ketika arus *freewheeling* melalui dioda, tegangan jangkar di-*clamp* bernilai (hampir) nol.

Kecepatan motor ditentukan oleh tegangan jangkar rata-rata, (V_{dc}), yang pada gilirannya tergantung pada proporsi waktu siklus total (T) di mana transistor “dinyalakan”. Jika waktu “on” dan “off” didefinisikan sebagai $T_{on} = kT$ dan $T_{off} = (1-k) T$, di mana $0 < k < 1$, maka tegangan rata-rata hanya diberikan oleh

$$V_{dc} = kV \tag{10.1}$$

Darimana dilihat bahwa kendali kecepatan dilakukan melalui rasio saat *on*, k .



Gambar 10.1 Motor dc yang diumpankan *Chopper*.

Dalam (a) transistor dalam keadaan “on” dan arus jangkar mengalir melalui sumber tegangan; pada (b) transistor dalam keadaan “off” dan *freewheel* arus jangkar melalui dioda. Tegangan jangkar tipikal dan bentuk gelombang arus ditunjukkan pada (c), dengan garis putus-putus mewakili bentuk gelombang arus ketika torsi beban dikurangi setengahnya.

Sekarang beralih ke bentuk gelombang arus yang ditunjukkan pada Gambar 10.1(c), bentuk gelombang atas sesuai dengan beban penuh, yaitu arus rata-rata (I_{dc}) menghasilkan torsi pengenalan penuh motor. Jika sekarang torsi beban pada poros motor dikurangi menjadi setengah torsi, dan dengan asumsi bahwa resistansi dapat diabaikan, kecepatan keadaan tunak akan tetap sama tetapi rata-rata arus keadaan tunak baru akan berkurang setengahnya, seperti ditunjukkan oleh yang lebih bawah pada kurva putus-putus. Namun dapat dicatat bahwa meskipun arus rata-rata ditentukan oleh beban, arus riak tidak berubah, dan akan dijelaskan di bawah.

Jika resistensi diabaikan, persamaan yang mengatur arus selama periode “on” adalah

$$V = E + L \frac{di}{dt}, \quad \text{atau} \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(V - E) \quad (10.2)$$

Karena V lebih besar dari E , gradien arus (di/dt) adalah positif, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10.1(c). Selama periode “on” ini, baterai mencatu daya ke motor. Sebagian energi dikonversi menjadi daya keluaran mekanis, tetapi sebagian juga disimpan dalam medan magnet yang terkait dengan induktansi. Yang terakhir diberikan oleh $1/2Li^2$, dan saat arus (i) naik, lebih banyak energi disimpan.

Selama periode “off”, persamaan yang mengatur arus adalah

$$0 = E + L \frac{di}{dt}, \quad \text{atau} \quad \frac{di}{dt} = -\frac{E}{L} \quad (10.3)$$

Dapat dicatat bahwa selama waktu “off”, gradien arus negatif (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.1(c)) dan ditentukan oleh gerakan GGL, E . Selama periode ini, motor menghasilkan tenaga keluaran mekanis yang dicatu dari energi yang tersimpan dalam induktansi. Tidak mengherankan arus turun karena energi yang sebelumnya disimpan dalam periode “on” sekarang berhenti.

Naik turunnya arus (misal riak arus) berbanding terbalik dengan induktansi tetapi tidak tergantung pada arus dc rata-rata, misal riak tidak tergantung pada beban.

Untuk mempelajari hubungan daya masukan/keluaran, dapat diatit bahwa arus baterai hanya mengalir selama periode “on”, dan oleh karena itu nilai rata-ratanya adalah kI_{dc} . Karena tegangan baterai konstan, daya yang dicatu hanya diberikan oleh $V(kI_{dc}) = kVI_{dc}$. Melihat sisi motor, tegangan rata-rata diberikan oleh $V_{dc} = kV$, dan arus rata-rata (diasumsikan konstan) adalah I_{dc} , sehingga masukan daya ke motor lagi kVI_{dc} , misal tidak ada penurunan daya di *chopper* ideal.

10.2 Karakteristik Kecepatan Torsi Dan Pengaturan Kendali

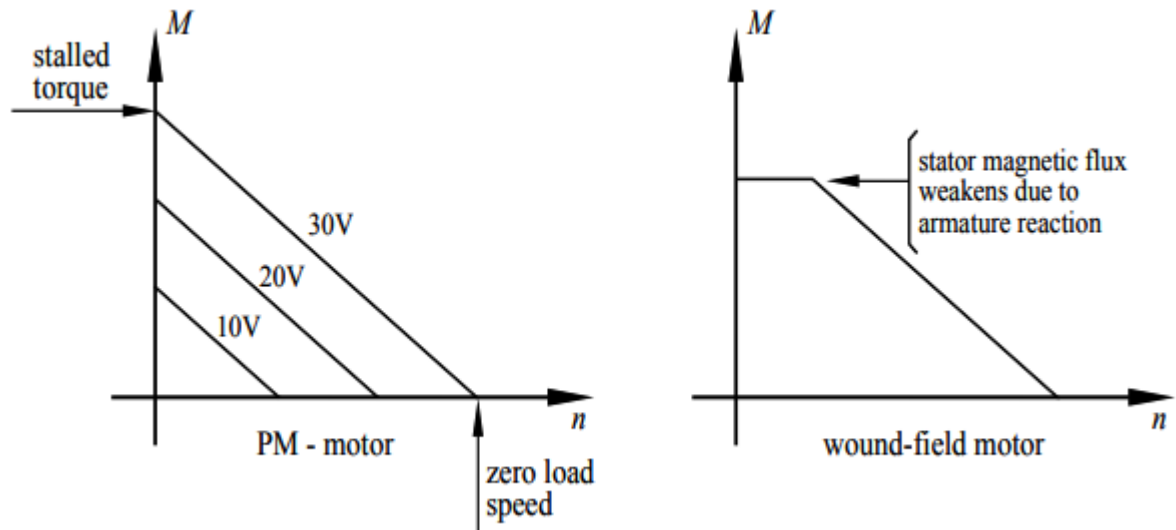
Di bawah kondisi *loop* terbuka (misal di mana rasio *mark-space chopper* ditetapkan pada nilai tertentu) perilaku motor yang diumpangkan *chopper* mirip dengan motor yang diumpangkan konverter yang dibahas sebelumnya (lihat Gambar 8.3). Ketika arus jangkar kontinyu, kecepatan turun hanya sedikit dengan beban, karena tegangan jangkar rata-rata tetap konstan. Tetapi ketika arus jangkar diskontinyu (yang paling mungkin pada kecepatan tinggi dan beban ringan) kecepatan turun dengan cepat ketika beban meningkat, karena tegangan jangkar rata-rata turun dengan meningkatnya beban. Arus diskontinyu dapat dihindari dengan menambahkan induktor secara seri dengan jangkar, atau dengan meningkatkan frekuensi *chopping*, tetapi ketika kendali kecepatan *loop* tertutup digunakan, efek yang tidak diinginkan dari arus diskontinyu ditutupi oleh *loop* kendali.

Filosofi dan pengaturan kendali untuk motor yang diumpangkan *chopper* sama dengan motor yang diumpangkan konverter, dengan pengecualian yang jelas bahwa rasio *mark-space chopper* digunakan untuk memvariasikan tegangan keluaran, daripada sudut penyalaan.

10.3 Pada Motor Magnet Permanen

Dengan motor dc kecil, medan magnet biasanya diproduksi oleh magnet permanen keramik. Jelas bahwa karakteristik motor tersebut sangat mirip dengan motor dc dengan belitan medan. Motor magnet permanen memiliki sifat yang lebih baik, diantaranya adalah:

1. Kurva $M-n$ linier yang ditunjukkan pada Gambar 10.2. Reaksi jangkar memiliki pengaruh yang lebih kecil pada fluks daripada dalam kasus *wound poles* karena:
 - Permealibilitas bahan keramik sangat rendah (hampir sama dengan udara).
 - Kekuatan koersitif material magnet permanen melawan perubahan sebagai hasil dari aksi medan dan jangkar.



Gambar 10.2 Kurva M - n motor magnet permanen.

2. Dimensi kecil dari motor. Sebagai hasil dari daya koersitif tinggi dari magnet permanen, dimensi radial dari kutub jauh lebih kecil daripada potongan *wound pole* yang menghasilkan motor magnet permanen lebih kecil dan lebih ringan dari motor dc konvensional dengan daya yang setara.
3. Tidak ada daya yang hilang di liitan medan.
4. Torsi awal yang tinggi.

11. KEMUDI SERVO DC

Arti tepat dari istilah “servo” dalam konteks motor dan kemudi sulit dijabarkan. Secara umum, jika sebuah kemudi memasukkan “servo” dalam uraiannya, implikasinya adalah bahwa ia dimaksudkan khusus untuk *loop* tertutup atau kendali umpan balik, biasanya torsi poros, kecepatan, atau posisi. Servomekanisme awal dikembangkan terutama untuk aplikasi militer, dan dengan cepat menjadi jelas bahwa motor dc standar tidak selalu cocok untuk kendali presisi. Secara khusus, rasio torsi tinggi terhadap inersia diperlukan, bersama dengan torsi bebas riak halus. Oleh karena itu motor dikembangkan untuk memenuhi persyaratan yang menuntut ini, dan tidak mengherankan jauh lebih mahal. Apakah biaya tambahan motor servo dapat dibenarkan tergantung pada spesifikasi. Calon pengguna tentu saja harus selalu berjaga-jaga untuk memastikan agar tidak terdesak ke dalam pembelian mahal ketika kemudi industri konvensional dapat mengatasi dengan baik.



Plate 4 Motor servo dc permanen magnet berperforma tinggi dengan tachno/encoders integral.

Mayoritas servo kemudi dijual dalam bentuk modular, terdiri dari motor magnet permanen berkinerja tinggi, seringkali dengan tachogenerator integral, dan modul power amplifier tipe *chopper*. Penguat kemudi biasanya membutuhkan catu daya dc yang diatur secara terpisah, jika catu daya harus diambil dari sumber listrik ac. Daya keluaran kontinyu berkisar dari beberapa watt hingga mungkin 2-3 kW, dengan tegangan 12, 24, 48, dan kelipatan 50 V sebagai standar.

11.1 Motor Servo

Meskipun tidak ada garis pemisah yang sangat jelas antara motor servo dan motor biasa, tipe servo akan ditujukan untuk digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan akselerasi dan perlambatan yang cepat. Desain motor akan mencerminkan hal ini dengan memenuhi arus intermiten (dan torsi) berkali-kali dari nilai pengenal yang terus menerus. Karena sebagian besar motor servo berukuran kecil, resistansi jangkarnya relatif tinggi, oleh karena itu arus hubung singkat (*locked-rotor*), mungkin hanya lima kali arus pengenal kontinyu. Dan penguat kemudi biasanya akan dipilih sehingga dapat mengatasi kondisi ini tanpa kesulitan, memberikan motor akselerasi yang sangat cepat dari jeda. Kondisi yang lebih sulit di mana tegangan jangkar penuh tiba-tiba terbalik dengan motor berjalan pada kecepatan penuh juga cukup normal. (Kedua mode operasi ini, tentu saja, akan sangat tidak terpikirkan dengan motor dc besar, karena arus besar yang akan mengalir sebagai hasil dari resistensi jangkar per unit yang jauh lebih rendah.) Karena penguat kemudi harus memiliki kemampuan arus tinggi untuk menyediakan akselerasi tinggi yang diminta, biasanya tidak perlu menggunakan *loop* arus dalam dari tipe yang dibahas sebelumnya.

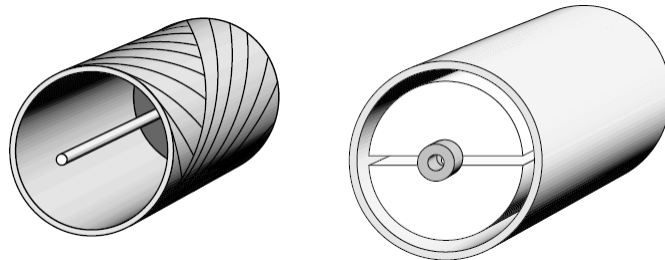
Untuk memaksimalkan akselerasi, inersia rotor harus diminimalkan. Dan satu cara yang jelas untuk mencapai ini adalah dengan membangun motor di mana hanya rangkaian listrik (konduktor) pada gerakan rotor, bagian magnetik (baik besi atau magnet permanen) stasioner yang tersisa. Prinsip ini diadopsi dalam motor "*ironless rotor*" dan "*printed armature*".

Dalam tipe rotor tanpa besi atau *moving-coil* (Gambar 11.1), konduktor jangkar dibentuk sebagai silinder berdinding tipis yang pada dasarnya terdiri tidak lebih dari *varnished wires wound* dalam bentuk miring bersama dengan komutator tipe piringan (*disk*) (tidak ditampilkan). Di dalam jangkar duduk magnet permanen 2-kutub (N atas, S rendah), yang menyediakan aliran radial, dan di luar itu adalah kerangka silinder baja yang melengkapi sirkuit magnetik.

Tidak perlu dikatakan bahwa tidak adanya celah untuk mendukung lilitan jangkar menghasilkan struktur yang relatif rapuh, yang karena itu terbatas pada diameter tidak lebih dari 1 cm. Karena ukurannya yang kecil, maka sering dikenal sebagai mikromotor dan sangat banyak digunakan dalam kamera, sistem video, pembaca kartu dan lain-lain

Jenis jangkar cetak (*printed armature*) lebih kuat dan dibuat dalam ukuran hingga beberapa kilowatt. Umumnya dibuat dalam bentuk cakram atau *pancake*, dengan arah aliran aksial dan radial arus jangkar. Konduktor jangkar menyerupai jari-jari pada roda, konduktor itu sendiri dibentuk pada piringan yang ringan. Versi awal dibuat dengan menggunakan teknik rangkaian cetak, tetapi pembuatan fabrikasi sekarang lebih umum. Karena biasanya ada setidaknya 100

konduktor jangkar, torsi tetap hampir konstan saat rotor berputar, yang memungkinkan menghasilkan rotasi yang sangat halus pada kecepatan rendah. Inersia dan induktansi jangkar bernilai rendah, memberikan respons dinamis yang baik. Bentuk pendek dan besar membuatnya cocok untuk aplikasi seperti peralatan mesin dan kemudi piringan di mana ruang aksial berada pada premium.

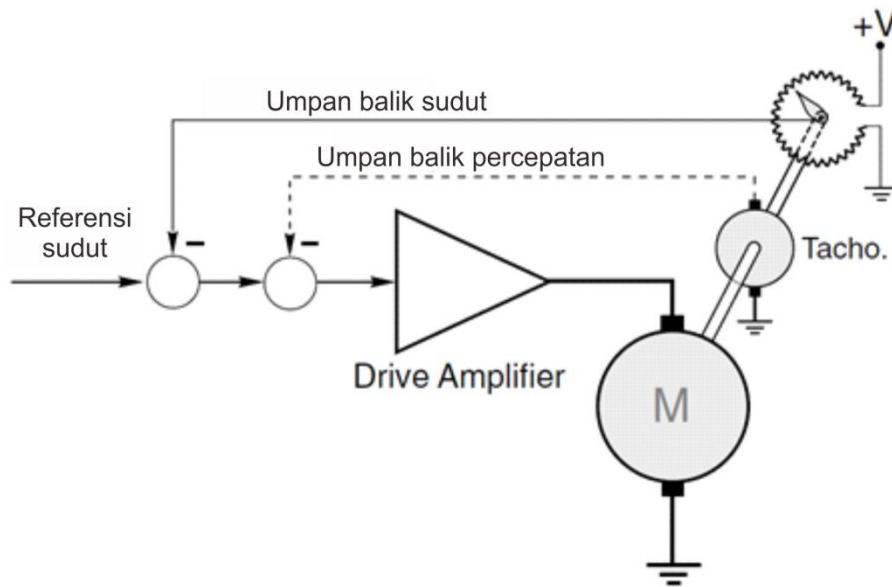


Gambar 11.1 Motor dc *ironless-rotor*. Komutator (tidak ditampilkan) biasanya dari jenis *disk*.

11.2 Kendali Posisi

Seperti disebutkan sebelumnya, banyak motor servo digunakan dalam aplikasi kendali posisi *loop* tertutup, sehingga sangat tepat untuk melihat secara singkat bagaimana hal ini dicapai. Kemudian akan dilihat bahwa motor penggerak menyediakan metode *loop* terbuka alternatif untuk kendali posisi, yang dapat lebih murah untuk beberapa aplikasi.

Dalam contoh yang ditunjukkan pada Gambar 11.2, posisi sudut poros keluaran dimaksudkan untuk mengikuti tegangan referensi (θ_{ref}). Tetapi harus jelas bahwa jika motor menggerakkan keluaran sabuk linear bergigi juga dapat diperoleh. Potensiometer yang dipasang pada keluaran poros memberikan tegangan umpan balik yang proporsional dengan posisi aktual keluaran poros. Tegangan dari potensiometer ini harus merupakan fungsi sudut linear, dan tidak boleh berbeda dengan suhu, jika tidak, keakuratan sistem akan diragukan.



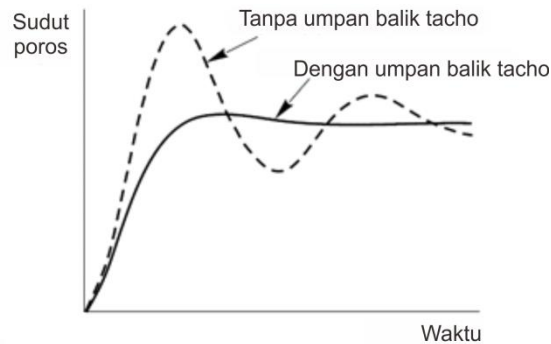
Gambar 11.2 Kendali posisi sudut *loop* tertutup menggunakan motor dc dan umpan balik sudut dari potensiometer tipe servo.

Tegangan umpan balik (mewakili sudut aktual poros) dikurangi dari tegangan referensi (mewakili posisi yang diinginkan) dan sinyal kesalahan posisi yang dihasilkan diperkuat dan digunakan untuk menggerakkan motor sehingga dapat memutar keluaran poros ke arah yang diinginkan. Ketika keluaran poros mencapai posisi target, kesalahan posisi menjadi nol, tidak ada tegangan yang diterapkan ke motor, dan keluaran poros tetap diam. Setiap upaya untuk secara fisik memindahkan poros keluaran dari posisi targetnya segera menciptakan kesalahan posisi dan torsi mengembalikannya diterapkan oleh motor.

Kinerja dinamis dari skema sederhana yang dijelaskan di atas sangat tidak memuaskan. Untuk mencapai respons yang cepat dan untuk meminimalkan kesalahan posisi yang disebabkan oleh gesekan statis, penguatan amplifier harus tinggi. Tetapi ini pada gilirannya mengarah pada respons yang sangat berosilasi yang biasanya tidak dapat diterima. Untuk beberapa aplikasi beban tetap, masalah dapat diperbaiki dengan menambahkan jaringan kompensasi pada masukan ke amplifier, tetapi solusi terbaik adalah dengan menggunakan umpan balik "tacho" (kecepatan) (ditunjukkan pada Gambar 11.2) di samping posisi utama umpan balik.

Umpan balik tacho jelas tidak berpengaruh pada perilaku statis (karena tegangan dari tacho sebanding dengan kecepatan motor), tetapi memiliki efek meningkatkan redaman respon transien. Oleh karena itu, penguatan amplifier dapat dibuat tinggi untuk memberikan respons yang cepat, dan tingkat umpan balik tacho kemudian dapat disesuaikan untuk memberikan

redaman yang diperlukan (lihat Gambar 11.3). Banyak motor servo memiliki tachogenerator integral untuk tujuan ini.



Gambar 11.3 Respons langkah tipikal untuk sistem kendali posisi *loop* tertutup, menunjukkan peningkatan redaman yang diperoleh dengan menambahkan umpan balik tacho.

Contoh di atas berurusan dengan skema analog untuk kepentingan kesederhanaan, tetapi skema kendali posisi digital sekarang diutamakan, terutama ketika motor tanpa sikat (*brushless*) digunakan.

11.3 Sensor untuk Kemudi Servo

Kemudi servo memerlukan sensor arus bandwidth tinggi untuk *loop* torsi dalam dan akurasi tinggi, kecepatan bebas kebisingan dan sensor posisi untuk *loop* luar. Sensor arus berupa perangkat Hall dengan penguat (*amplifier*) yang dapat memiliki bandwidth hingga 100 kHz. *Loop* arus dalam membatasi dan secara terus-menerus mengatur arus motor dalam semua mode operasi kemudi, termasuk akselerasi dan perlambatan. Sekitar 2-3 kali, arus pengenal kontinu motor ditoleransi selama akselerasi dan perlambatan. Ini berarti membatasi keluaran pengendali kecepatan ke tingkat yang sesuai dengan keluaran sensor arus untuk nilai batas arus motor.

Keluaran sensor harus disaring untuk menghilangkan kebisingan frekuensi *switching* secara memadai. Jika tidak, perangkat *switching* tertentu dalam konverter mungkin kelebihan beban. Tugas ini lebih penting bagi konverter thyristor untuk kemudi dc yang frekuensinya lebih rendah. Penyaringan keluaran sensor arus membatasi bandwidth sistem kendali arus, yaitu *loop* kendali torsi dalam.

Kinerja kemudi motor servo sangat bergantung pada kebisingan dan akurasi sensor kecepatan dan posisi. Penyelesai sinkronisasi dengan digital 12-bit atau lebih tinggi digunakan di banyak

sistem kemudi servo hingga saat ini. Munculnya encoder optik tambahan yang lebih murah dan absolut telah mengubah situasi ini sepenuhnya. Sensor digital ini sebenarnya adalah sensor posisi. Informasi kecepatan diperoleh dari posisi yang diukur dengan diferensiasi diskrit. Diferensiasi seperti itu tidak mungkin dilakukan dengan sensor posisi analog karena kebisingan.

Tachometer analog juga dihindari untuk sistem servo kecepatan karena riak tachogenerator yang melekat pada sensor. sensor posisi diskrit modern menyediakan kecepatan dan penginderaan posisi yang nyaris tanpa kebisingan. Ini memungkinkan respon dinamis yang sangat cepat dicapai jika frekuensi *switching* konverter memungkinkannya.

12. KEMUDI YANG DIKENDALIKAN SECARA DIGITAL

Seperti dalam semua bentuk kendali industri dan presisi, implementasi digital telah menggantikan sirkuit analog di banyak sistem penggerak listrik. Tetapi ada beberapa contoh di mana hal ini telah mengakibatkan perubahan nyata pada struktur kemudi yang ada. Dan dalam banyak kasus memahami bagaimana kemudi fungsi masih lebih baik didekati dalam contoh pertama dengan mempelajari versi analog. Tentu saja ada sistem penting yang sebagian besar digital, seperti kemudi inverter PWM (dan kemudi yang akan datang yang menggunakan pengonversi matriks dapat muncul dan hanya mungkin menggunakan kendali digital. Tetapi sejauh memahami kemudi dc, pengguna yang telah mengembangkan pemahaman yang baik tentang bagaimana versi analog beroperasi akan menemukan sedikit kesulitan ketika mempertimbangkan setara digital. Oleh karena itu, bagian ini terbatas pada pertimbangan beberapa keuntungan yang ditawarkan oleh implementasi digital.

Banyak kemudi menggunakan umpan balik kecepatan digital, di mana melatih pulsa yang dihasilkan dari encoder yang dipasang di poros dibandingkan (menggunakan *loop phase-locked*) dengan melatih pulsa referensi yang frekuensinya sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Frekuensi referensi dapat dengan mudah dibuat akurat dan melintas bebas, dan derau dalam sinyal encoder mudah ditolak, sehingga kecepatan untuk mempertahankan keadaan yang sangat tepat dapat dijamin. Hal ini sangat penting ketika sejumlah motor independen harus kendalikan dengan kecepatan yang sama. *Loop* fasa terkunci juga digunakan dalam rangkaian sinkronisasi pulsa penyalan untuk mengatasi masalah yang disebabkan oleh derau pada gelombang utama.

Pengontrol digital menawarkan kebebasan dari penyimpangan, fleksibilitas tambahan (misal *ramp-up* yang dapat diprogram, *ramp-down*, kecepatan maksimum dan minimum dan lain-lain). Kemudahan *interfacing* dan menghubungkan ke kemudi lain dan komputer *host* dan pengendali, dan *self-tuning*. Diagnostik yang mudah digunakan merupakan manfaat lain, memberikan data saat ini dan historis kepada pengguna lokal atau jarak jauh tentang keadaan semua variabel kemudi utama. Banyak dari keunggulan ini juga ditawarkan dengan kemudi yang terus menggunakan kendali analog di tahap elektronik daya.

13. CONTOH INDUSTRI: COPLEY CONTROLS

Copley Controls adalah produsen amplifier untuk motor *brushed* dan *brushless* pada aplikasi industri robotika. Salah satu modelnya adalah Accelus seperti yang terlihat pada Gambar 13.1. Accelus mendukung berbagai mode operasi, misalnya kendali arus motor atau kecepatan agar sebanding dengan masukan tegangan analog atau siklus kerja input PWM. Mikrokontroler pada Accelus menginterpretasikan masukan analog atau siklus kerja PWM dan mengimplementasikan pengendali.

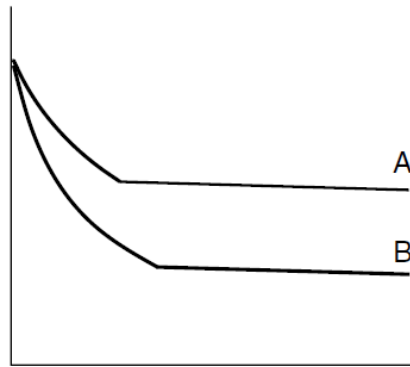


Gambar 13.1 Copley Control Accelus Amplifier.

Mode yang paling relevan bagi pengguna adalah mode posisi terprogram. Dalam metode ini, pengguna menetapkan beberapa parameter untuk menggambarkan gerakan yang diinginkan dari motor. Tugas pengendali adalah menggerakkan motor untuk melacak lintasan. Ketika amplifier pertama kali dipasangkan dengan motor, beberapa langkah inisialisasi harus dilakukan. Antarmuka GUI pada komputer host, yang disediakan oleh Copley, berkomunikasi dengan mikrokontroler pada Accelus menggunakan RS-232.

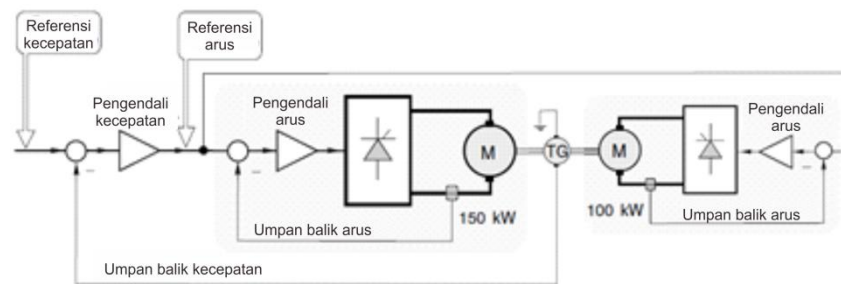
PERTANYAAN ULASAN

1. Kemudi motor dc yang dikendali dengan kecepatan sedang berjalan dengan kecepatan 50% dari kecepatan penuh. Jika referensi kecepatan dinaikkan menjadi 100%, dan motor dibiarkan menetap, bagaimana Anda mengharapkan nilai keadaan tunak baru dari tegangan jangkar, tegangan tacho, dan arus jangkar untuk membandingkan dengan nilai-nilai yang sesuai ketika motor berjalan pada 50 % kecepatan?
2. Kemudi motor dc memiliki pengendali kecepatan PI. Kemudi awalnya berjalan pada kecepatan 50% dengan motor tanpa beban. Torsi beban 100% kemudian diterapkan pada poros. Bagaimana Anda mengharapkan nilai keadaan tunak baru dari tegangan jangkar, tegangan tacho dan arus jangkar untuk dibandingkan dengan nilai-nilai yang sesuai sebelum beban diterapkan?
3. Kemudi motor dc yang diturunkan dimulai dari keadaan diam dengan menerapkan permintaan kecepatan 100% mendadak. Bagaimana Anda mengharapkan tegangan dan arus jangkar bervariasi saat motor berjalan dengan kecepatan?
4. Apa yang Anda harapkan terjadi pada kemudi dc yang berjalan dengan torsi 50% pada kecepatan 50% jika:
 - a) tegangan listrik turun 10%;
 - b) kabel tacho secara tidak sengaja ditarik dari atas;
 - c) motor yang ditangkap padat;
 - d) hubungan arus pendek ditempatkan melintasi terminal jangkar;
 - e) sinyal umpan balik arus telah dihapus.
5. Mengapa operasi diskontinyu umumnya tidak diinginkan dalam motor dc?
6. Apa perbedaan antara pengereman dinamis dan pengereman regeneratif?
7. Jelaskan mengapa, dalam konteks kemudi, sering dikatakan bahwa semakin tinggi induktansi rangkaian jangkar mesin dc, semakin baik. Dalam hal apa induktansi jangkar tinggi tidak diinginkan?
8. Karakteristik kecepatan-orsi ditunjukkan pada Gambar Q2.1 terkait dengan motor dc yang dipasok dari konverter thyristor yang dikendali penuh. Identifikasi sumbu. Tunjukkan bagian mana dari karakteristik yang menunjukkan kinerja “baik” dan bagian mana yang menunjukkan kinerja “buruk”, dan jelaskan secara singkat apa yang menyebabkan perubahan perilaku yang tiba-tiba. Jika kurva A sesuai dengan sudut penyalan 5° , perkirakan sudut penyalan untuk kurva B. Bagaimana bentuk kurva berubah jika induktansi tambahan substansial ditambahkan secara seri dengan jangkar motor?



Gambar Q2.1.

9. Penggerak 250 kW untuk *drawbench* pabrik tabung harus direkayasa menggunakan dua motor dengan nilai 150 kW, 1200 putaran/menit dan 100 kW, masing-masing 1200 putaran/menit, dan digabungkan ke poros umum. Setiap motor dilengkapi dengan penggerak terkendali kecepatannya sendiri. Spesifikasi meminta motor untuk membagi beban secara proporsional dengan peringkatnya, sehingga kendali diatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar Q2.2 (beban tidak ditampilkan).



Gambar Q2.2.

- Jelaskan secara singkat mengapa skema ini disebut sebagai pengaturan *master/slave*.
- Bagaimana pembagian beban tercapai?
- Diskusikan mengapa pengaturan ini lebih disukai daripada yang di mana kedua kemudi memiliki *loop* kecepatan luar aktif.
- Apakah akan ada keuntungan dalam mengumpankan referensi arus untuk kemudi yang lebih kecil dari sinyal umpan balik saat ini dari kemudi yang lebih besar?

DAFTAR PUSTAKA

1. Hughes A. Electric motors and drives: fundamentals. Elsevier Science & Technology; 2005.
2. Hughes A, Drury B. Chapter Four - D.C. Motor Drives. In: Hughes A, Drury BBT-EM and D (Fourth E, editors. Boston: Newnes; 2013. p. 113–40. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080983325000048>
3. Rahman MF, Patterson D, Cheok A, Betz R. 30 - Motor Drives. In: Rashid MHBT-PEH (Fourth E, editor. Butterworth-Heinemann; 2018. p. 945–1021. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114070000349>
4. Pollefliet J. 19 - Speed- and (or) Torque-Control of a DC-motor. In: Pollefliet JBT-PE, editor. Academic Press; 2018. p. 19.1–19.56. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128146415500044>
5. Manias SN. 12 - Introduction to Motor Drive Systems. In: Manias SNBT-PE and MDS, editor. Academic Press; 2017. p. 843–967. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128117989000123>
6. Lynch KM, Marchuk N, Elwin ML. Chapter 27 - DC Motor Control. In: Lynch KM, Marchuk N, Elwin MLBT-EC and M with the P, editors. Oxford: Newnes; 2016. p. 439–58. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124201651000275>

(1)(2)(3)(4)(5)(6)