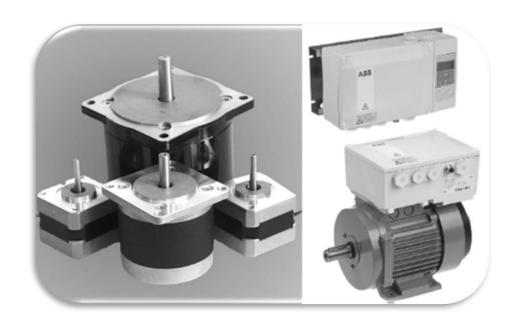
Diktat IV Kuliah Kendali Motor:

MOTOR STEPPER, MOTOR SINKRON DAN PENGENDALIANNYA



Tole Sutikno, Ph.D.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN
2019/2020

Kata Pengantar

Puji syukur kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karuniaNya

sehingga diktat/bahan ajar "MOTOR STEPPER, MOTOR SINKRON DAN PENGENDALIANNYA" ini

telah diselesaikan. Diktat ini disusun sebagai buku ajar mahasiswa Strata 1 maupun Diploma jurusan Teknik

Elektro. Diktat ini disusun berdasarkan referensi dari berbagai buku, hasil penelitian dan data dari industri

yang berkaitan. 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 2020

Penulis

Tole Sutikno

DAFTAR ISI

| MOTOR STEPPER | 5 |
|---|----|
| PENDAHULUAN | 5 |
| Kontrol posisi loop terbuka | 5 |
| Pembangkitan Pulsa Step Dan Respons Motor | 6 |
| Kecepatan Putaran Tinggi dan Ramping (High-Speed Running And Ramping) | 8 |
| PRINSIP OPERASI MOTOR | 10 |
| Motor Reluctance Variable | 12 |
| Motor hibrida | 13 |
| Summary | 16 |
| KARAKTERISTIK MOTOR | 17 |
| Kurva torsi-perpindahan statis | 17 |
| Stepper-Tunggal (Single-stepping) | 19 |
| Kesalahan posisi step dan menahan torsi | 19 |
| Half stepping | 21 |
| Step division – mini-stepping | 22 |
| KARAKTERISTIK IDEAL STEADY-STATE DRIVE (ARUS KONSTAN) | 23 |
| Persyaratan Kemudi (drive) | 24 |
| Pull-out torsi dalam kondisi arus konstan | 25 |
| RANGKAIAN DRIVE DAN KURVA TORSI-KECEPATAN PULL-OUT | 28 |
| Drive Tegangan Konstan | 28 |
| Kemudi (drive) Arus-dipaksa | 30 |
| Kemudi (drive) Chopper | 31 |
| Resonansi dan ketidakstabilan (Resonances and instability) | 33 |
| KINERJA TRANSIEN | 35 |
| Respon Step | 35 |
| Memulai dari istirahat (Starting from rest) | 36 |
| Akselerasi optimal dan kontrol loop tertutup | 37 |
| TINJAUAN PERTANYAAN | 38 |
| PENGGUNAAN INVERTER UNTUK PENGENDALI MOTOR INDUKSI | 40 |
| PENDAHULUAN | 40 |
| Perbandingan Menggunakan Pengendali D.C | 41 |
| Bentuk Gelombang Inverter | 43 |

| Operasi Steady-State- Pentingnya Mencapai Fluks Penuh | 45 |
|---|----|
| KARAKTERISTIK TORSI KECEPATAN OPERASI V/F KONSTAN | 47 |
| Keterbatasan Yang Diberlakukan Oleh Inverter Daya Dan Torsi Konstan | 49 |
| Keterbatasan Yang Dikenakan Oleh Motor | 51 |
| PENGATURAN PENGENDALIAN UNTUK KEMUDI (DRIVE) MENGGUNAKAN INVERTER | 52 |
| Kontrol Kecepatan Loop Terbuka | |
| KENDALI VEKTOR ORIENTASI BIDANG | |
| Kontrol Torsi Transien | |
| KEMUDI CYCLOCONVERTER | |
| REVIEW PERTANYAAN | |
| SYNCHRONOUS, BRUSHLESS D.C DAN PENYAKELARAN DRIVE RELUCTANCE | |
| PENDAHULUAN | |
| MOTOR MOTOR SINKRON | |
| Motor Motor Keluar Rotor Exited-Rotor | |
| Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron Diluar Rotor | |
| Diagram Fasor dan Kontrol Faktor Daya | |
| Starting | |
| Permanen Magnet Motor Sinkron | |
| Motor-Motor Histeresis | |
| Reluctance motor | |
| Kontrol kecepatan motor sinkron | |
| Kendali Open-loop inverter-fed motor sinkron | |
| Operasi sinkronisasi otomatis (loop tertutup) | |
| Karakteristik dan kontrol operasi | |
| BRUSHLESS DC MOTOR | |
| RELUKTANSI PENYAKLARAN KENDALI MOTOR | 85 |
| Prinsip operasi | |
| Prediksi dan kontrol torsi | |
| Keseluruhan Converter daya dn karakteristik kemudi | |
| Review Pertanyaan | 91 |

MOTOR STEPPER

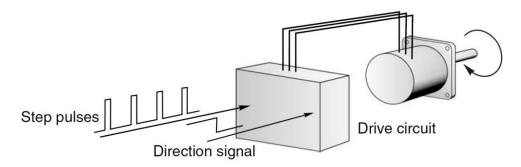
PENDAHULUAN

Motor stepper menarik karena dapat dikontrol langsung oleh komputer atau mikrokontroler. Fitur unik mereka adalah bahwa poros keluaran berputar dalam serangkaian interval sudut diskrit, atau langkah-langkah, satu langkah diambil setiap kali pulsa perintah diterima. Ketika sejumlah pulsa telah disuplai, poros akan berputar melalui sudut yang diketahui, dan ini membuat motor cocok untuk kontrol posisi loop terbuka.

Kebanyakan motor stepper terlihat sangat mirip dengan motor konvensional, dan sebagai panduan umum kita dapat mengasumsikan bahwa torsi dan kekuatan motor stepper serupa dengan torsi dan kekuatan motor konvensional yang benar-benar tertutup dengan dimensi dan rentang kecepatan yang sama. Sudut langkah sebagian besar berada dalam kisaran 1.8° hingga 90° , dengan torsi mulai dari $1\mu Nm$ (dalam motor arloji mungil berdiameter 3 mm) hingga mungkin 40 Nm dalam motor berdiameter 15 cm yang cocok untuk aplikasi peralatan mesin di mana kecepatan 500 putaran/menit. Sebagian besar aplikasi berada di antara batas-batas ini, dan menggunakan motor yang nyaman dapat dipegang di tangan.

Kontrol posisi loop terbuka

Dasar sistem motor stepper ditunjukkan pada Gambar 1.1. Kemudi rangkaian *switching* elektronik, yang menyuplai motor, dan dibahas kemudian. Outputnya adalah posisi sudut poros motor, sedangkan input terdiri dari dua sinyal digital berdaya rendah (*low-power*).



Gambar 1.1 Kontrol posisi loop-terbuka menggunakan motor stepper

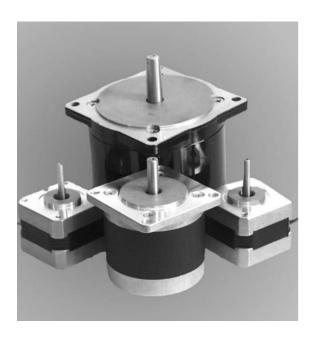


Plate 1.1 Hybrid 1.8° motor stepper, ukuran 34 (diameter 3,4 inci), 23 dan 17. (Foto milik Astrosyn)

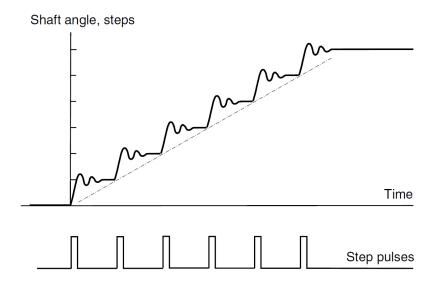
Setiap kali pulsa berlangsung pada jalur input langkah, motor mengambil satu langkah, poros tetap pada posisi baru sampai pulsa langkah berikutnya disuplai. Keadaan garis arah ('tinggi' atau 'rendah') menentukan apakah motor melangkah searah atau berlawanan arah jarum jam. Karenanya, sejumlah pulsa langkah akan menyebabkan output poros berputar melalui sudut tertentu.

Satu korespondensi untuk satu pulsa antara langkah dan daya tarik besar motor stepper: ini memberikan kontrol posisi, karena output adalah posisi sudut poros output. Ini adalah sebuah sistem digital, karena sudut total yang diputar ditentukan oleh jumlah pulsa yang disediakan; dan itu adalah loop terbuka karena tidak ada umpan balik yang perlu diambil dari poros output.

Pembangkitan Pulsa Step Dan Respons Motor

Pulsa *steps* dapat dihasilkan oleh rangkaian osilator, yang itu sendiri dikontrol oleh tegangan analog, pengontrol digital atau mikroprosesor. Ketika sejumlah langkah tertentu harus diambil, pulsa osilator terjaga keamanannya terhadap kemudi dan pulsa dihitung, hingga jumlah langkah yang diperlukan tercapai, ketika gerbang osilator ditutup. Ini diilustrasikan pada Gambar 1.2, untuk urutan enam langkah. Ada pulsa perintah enam langkah, dengan jarak waktu yang sama, dan motor mengambil satu langkah mengikuti setiap pulsa.

Tiga fitur umum yang penting dapat diidentifikasi dengan mengacu pada Gambar 1.2. Pertama, meskipun sudut total yang diputar (enam langkah) hanya diatur oleh jumlah pulsa, kecepatan rata-rata poros (yang ditunjukkan oleh kemiringan garis putus-putus pada Gambar 9.2) tergantung pada frekuensi osilator. Semakin tinggi frekuensi, semakin pendek waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan enam langkah.



Gambar 1.2 Tipikal respon langkah(*step*) pada kereta(*train*) frekuensi rendah dari langkah(*step*) perintah pulsa

Kedua, tindakan melangkah(*stepping*) tidak sempurna. Rotor memerlukan waktu yang terbatas untuk bergerak dari satu posisi ke posisi lain, dan kemudian melampaui dan berosilasi sebelum akhirnya beristirahat di posisi yang baru. Waktu keseluruhan langkah-tunggal(*single-step*) bervariasi dengan ukuran motor, sudut langkah(*step*) dan sifat beban, tetapi umumnya dalam kisaran 5-100 ms. Ini seringkali cukup cepat untuk tidak dilihat oleh pendatang baru yang tidak waspada, meskipun langkah-langkah individu biasanya dapat didengar; motor kecil 'tanda' ketika mereka melangkah, dan yang lebih besar membuat 'klik' atau 'clunk' yang memuaskan.

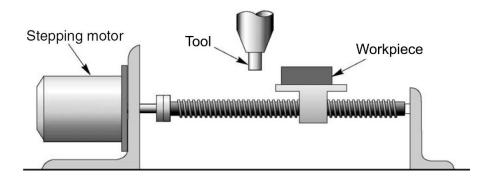
Ketiga, untuk memastikan posisi sempurna pada akhir urutan melangkah, kita harus mengetahui posisi sempurna di awal. Ini karena motor stepper adalah perangkat tambahan. Selama tidak disalahgunakan, ia akan selalu mengambil satu langkah ketika kemudi pulsa disuplai, tetapi untuk melacak posisi yang sempurna hanya dengan menghitung jumlah kemudi pulsa (dan ini setelah semua kebajikan utama dari sistem kita harus selalu memulai hitungan dari posisi datum yang diketahui. Biasanya penghitung langkah(step) akan 'memusatkan perhatian' dengan poros motor pada posisi datum, dan kemudian akan dihitung untuk arah searah jarum jam, dan turun untuk rotasi berlawanan arah jarum jam. Asalkan tidak ada langkah yang hilang (lihat nanti) nomor di penghitung langkah kemudian akan selalu menunjukkan posisi sempurna.

Kecepatan Putaran Tinggi dan Ramping (High-Speed Running And Ramping)

Pada diskusi sejauh ini dibatasi untuk operasi ketika pulsa perintah langkah disuplai pada tingkat yang konstan, dan dengan interval yang cukup lama antara pulsa untuk memungkinkan rotor untuk beristirahat di antara langkah-langkah. Sejumlah besar stepping motor kecil dalam arloji dan jam beroperasi terus menerus dengan cara ini, melangkah mungkin sekali setiap detik, tetapi sebagian besar aplikasi komersial dan industri membutuhkan kinerja yang lebih akurat dan bervariasi.

Untuk mengilustrasikan berbagai operasi yang mungkin terlibat, dan untuk memperkenalkan kecepatan tinggi, kita dapat melihat secara singkat aplikasi industri yang khas. *Tabel* yang digerakkan motor stepper pada mesin *milling* yang dikontrol secara numerik dengan baik menggambarkan kedua fitur operasional utama yang dibahas sebelumnya. Ini adalah kemampuan untuk mengontrol posisi (dengan menyediakan jumlah langkah yang diinginkan) dan kecepatan (dengan mengendalikan laju stepper).

Susunannya ditunjukkan secara diagram pada Gambar 1.3. Motor memutar *leadscrew* yang terhubung ke meja kerja, sehingga setiap langkah motor menyebabkan gerakan tambahan yang tepat dari benda kerja relatif ke alat pemotong. Dengan membuat peningkatan yang cukup kecil, fakta bahwa gerakan itu terpisah daripada terus menerus tidak akan menyebabkan kesulitan dalam proses pemesinan.



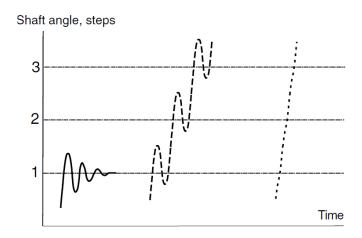
Gambar 1.3 Aplikasi dari stepping motor untuk kontrol posisi open-loop

Kami akan berasumsi bahwa kami telah memilih sudut langkah, pitch leadscrew, dan setiap gearing yang diperlukan untuk memberikan pergerakan tabel 0,01 mm per langkah motor. Kami juga akan mengasumsikan bahwa pulsa perintah langkah yang diperlukan akan dihasilkan oleh pengontrol digital atau komputer, yang diprogram untuk memasok jumlah pulsa yang tepat, pada kecepatan yang tepat untuk pekerjaan yang dilakukan.

Jika alat berat ini bertujuan umum, banyak operasi yang berbeda akan diperlukan. Saat mengambil potongan berat, atau bekerja dengan material keras, pekerjaan harus ditawarkan ke alat pemotong perlahan, katakanlah, 0,02 mm/s. Tingkat stepping harus ditetapkan ke 2 langkah/s. Jika kami ingin membuat slot dengan panjang 1 cm, maka kami akan memprogram controller untuk mengeluarkan 1000 langkah, dengan

kecepatan 2 langkah per detik, dan kemudian berhenti. Di sisi lain, kecepatan pemotongan dalam material yang lebih lunak bisa jauh lebih tinggi, dengan laju pengerjaan dalam kisaran 1 –100 langkah per detik sedang berurutan. Setelah menyelesaikan pemangkasan, Anda harus melintasi pekerjaan kembali ke posisi semula, sebelum memulai pemangkasan lain. Operasi ini perlu dilakukan secepat mungkin, untuk meminimalkan waktu yang tidak produktif, dan kecepatan melangkah mungkin 2000 langkah per detik (atau bahkan lebih tinggi), mungkin diperlukan.

Telah disebutkan sebelumnya bahwa satu langkah (dari jeda) membutuhkan waktu beberapa milidetik. Oleh karena itu harus jelas bahwa jika motor dijalankan pada 2000 langkah per detik (mis. 0,5 ms/langkah), motor tidak mungkin dapat beristirahat di antara langkah-langkah berturut-turut, seperti halnya pada tingkat loncatan yang rendah. Alih-alih, kami menemukan dalam praktiknya bahwa pada laju loncatan yang tinggi ini, kecepatan rotor menjadi cukup halus, dengan hampir tidak ada petunjuk luar tentang asal-usulnya yang bertahap. Namun demikian, korespondensi satu-ke-satu yang vital antara pulsa perintah langkah dan langkah-langkah yang diambil oleh motor tetap dipertahankan, dan fitur kontrol posisi loop terbuka dipertahankan. Kemampuan luar biasa ini untuk beroperasi pada kecepatan loncatan yang sangat tinggi (hingga 20.000 langkah per detik di beberapa motor), dan untuk tetap sepenuhnya selaras dengan pulsa perintah, adalah fitur paling mencolok dari sistem motor pijakan.



Gambar 1.4 Respons posisi-waktu pada tingkat stepping rendah, sedang dan tinggi

Operasi dengan kecepatan tinggi disebut sebagai 'slewing'. Transisi dari stepping tunggal (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2) ke kecepatan tinggi slewing adalah bertahap dan ditunjukkan oleh sketsa pada Gambar 1.4. Secara kasar, motor akan 'mati' jika laju loncatannya di atas frekuensi osilasi langkahtunggal. Ketika motor berada di kisaran slewing, mereka umumnya mengeluarkan rengekan terdengar, dengan frekuensi dasar sama dengan tingkat melangkah.

Tidak mengherankan jika mengetahui bahwa motor tidak dapat dimulai dari keadaan diam dan diharapkan untuk 'mengunci' secara langsung ke rangkaian pulsa perintah, katakanlah, 2.000 langkah per detik, yang berada dalam jangkauan slewing. Alih-alih, itu harus dimulai pada kecepatan melangkah yang lebih sederhana, sebelum dipercepat (atau 'ditingkatkan') hingga kecepatan: ini dibahas lebih lengkap nanti di Bagian 9.5. Dalam aplikasi ringan, ramping dapat dilakukan secara perlahan, dan tersebar di sejumlah besar langkah; tetapi jika laju loncatan tinggi harus dicapai dengan cepat, timing pulsa step individual harus sangat tepat.

Kita mungkin bertanya-tanya apa yang akan terjadi jika laju stepping meningkat terlalu cepat. Jawabannya sederhana saja bahwa motor tidak akan dapat tetap 'dalam langkah' dan akan berhenti. Pulsa perintah langkah masih akan dikirimkan, dan penghitung langkah akan mengakumulasikan apa yang dianggapnya sebagai langkah motor, tetapi, pada saat itu, sistem akan gagal total.

Mode kegagalan yang sama akan terjadi jika, ketika motor slewing, melatih pulsa langkah tiba-tiba berhenti, bukannya diperlambat secara progresif. Energi kinetik yang tersimpan dari motor (dan beban) akan menyebabkannya melampau, sehingga jumlah langkah motor akan lebih besar dari jumlah pulsa perintah. Kegagalan semacam ini dicegah dengan menggunakan kontrol loop tertutup, seperti yang akan dibahas nanti.

Akhirnya, perlu disebutkan bahwa motor loncatan dirancang untuk beroperasi dalam waktu lama dengan rotornya dipegang dalam posisi tetap (*step*), dan dengan arus pengenal dalam belitan (atau belitan). Karena itu, kita dapat mengantisipasi bahwa mengulur waktu pada umumnya tidak menjadi masalah untuk motor penggerak, sedangkan untuk sebagian besar jenis motor lain, mengulur-ulur mengakibatkan keruntuhan punggung. dan arus yang sangat tinggi yang dengan cepat dapat menyebabkan kelelahan.

PRINSIP OPERASI MOTOR

Prinsip yang menjadi dasar *steping motor* sangat sederhana. Ketika sebatang besi atau baja ditangguhkan sehingga bebas berputar dalam medan magnet, itu akan menyejajarkan dirinya dengan Las. Jika arah Lasan diubah, bilah akan berputar sampai sejajar lagi, dengan aksi yang disebut torsi keengganan. (Mekanisme ini serupa dengan jarum kompas, kecuali jika kompas memiliki jarum besi dan bukan magnet permanen, ia akan mengendap di sepanjang medan magnet bumi tetapi mungkin agak lambat dan akan ada ambiguitas antara N dan S!).

Sebelum menjelajahi detail konstruksi, ada baiknya mengatakan sedikit lebih banyak tentang torsi keengganan, dan hubungannya dengan mekanisme penghasil torsi yang telah kita temui sejauh ini dalam buku ini. Pembaca yang waspada akan menyadari bahwa, sampai bab ini, belum ada torsi keengganan, dan

karena itu mungkin bertanya-tanya apakah itu sama sekali berbeda dari apa yang telah kita bahas sejauh ini.

Jawabannya adalah bahwa di sebagian besar mesin listrik, dari generator di pembangkit listrik hingga induksi dan d.c. motor, torsi dihasilkan oleh interaksi Weld magnetik (diproduksi oleh belitan stator) dengan konduktor pembawa arus pada rotor. Kami mendasarkan pemahaman kami tentang bagaimana d.c. dan motor induksi menghasilkan torsi pada rumus sederhana F = BIl untuk gaya pada konduktor dengan panjang 1 yang membawa arus I tegak lurus terhadap kerapatan fluks magnetik B (lihat Bab 1). Tidak disebutkan torsi keengganan karena (dengan sedikit pengecualian) mesin yang mengeksploitasi mekanisme 'BIl' tidak memiliki torsi keengganan.

Seperti disebutkan di atas, torsi keengganan berasal dari kecenderungan batang besi untuk menyelaraskan diri dengan medan magnet: jika bar dipindahkan dari posisi penyelarasannya, ia mengalami torsi yang pulih. Karena itu rotor mesin yang menghasilkan torsi dengan aksi keengganan dirancang sedemikian rupa sehingga besi rotor memiliki proyeksi atau 'kutub' (lihat Gambar 1.5) yang sejajar dengan medan magnet yang dihasilkan oleh belitan stator.

Semua torsi kemudian diproduksi oleh tindakan keengganan, karena tanpa konduktor pada rotor untuk membawa arus, jelas tidak ada torsi 'BII'. Sebaliknya, setrika pada rotor d.c. dan motor induksi (idealnya) berbentuk silinder, dalam hal ini tidak ada orientasi 'rotor' yang disukai dari besi rotor, yaitu tidak ada torsi keengganan.

Karena dua mekanisme penghasil torsi tampak berbeda secara radikal, pendekatan yang diambil untuk mengembangkan model teoritis juga berbeda. Seperti yang telah kita lihat, rangkaian ekivalen sederhana tersedia untuk memungkinkan kita memahami dan memprediksi perilaku mesin 'BIl' utama seperti d.c. dan motor induksi, dan ini beruntung karena pentingnya mesin ini. Sayangnya, tidak ada perawatan sederhana yang tersedia untuk stepping dan mesin berbasis keengganan lainnya. Model numerik berbasis sirkuit untuk prediksi kinerja banyak digunakan oleh pabrikan tetapi tidak terlalu banyak digunakan untuk menerangi perilaku, jadi kami akan puas dengan membangun gambaran perilaku dari studi karakteristik operasi khas.

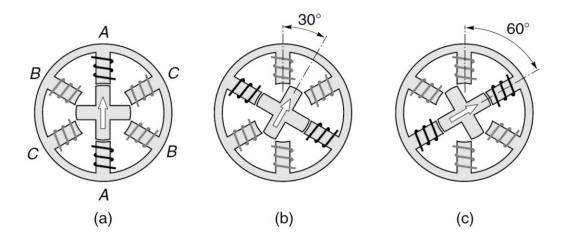
Dua tipe motor stepping yang paling penting adalah tipe variable reluctance (VR) dan tipe hybrid. Kedua tipe ini menggunakan prinsip keengganan, perbedaan antara keduanya terletak pada metode yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet. Pada jenis VR, Lasan diproduksi semata-mata oleh set gulungan yang membawa arus stasioner. Tipe hibrida juga memiliki set belitan, tetapi penambahan magnet permanen (pada rotor) memunculkan deskripsi 'hibrida' untuk jenis motor ini. Meskipun kedua jenis motor bekerja pada prinsip dasar yang sama, ternyata dalam praktiknya bahwa tipe VR menarik untuk sudut langkah yang lebih

besar (misalnya 15°, 30°, 45°), sedangkan hibrida cenderung paling cocok ketika sudut kecil (misalnya Diperlukan 1,8°, 2,5°).

Motor Reluctance Variable

Diagram disederhanakan dari motor stepping VR 30° per langkah ditunjukkan pada Gambar 9.5. Stator dibuat dari tumpukan laminasi baja, dan memiliki enam tiang atau gigi yang saling memproyeksikan dengan jarak yang sama, masing-masing membawa gelung terpisah. Rotor, yang mungkin padat atau berlaminasi, memiliki empat gigi yang menonjol, dengan lebar yang sama dengan gigi stator. Ada celah udara yang sangat kecil - biasanya antara 0,02 dan 0,2 mm - antara gigi rotor dan stator. Ketika tidak ada arus yang mengalir di kumparan stator, rotor akan bebas berputar.

Pasangan kumparan stator yang berlawanan secara diametrik dihubungkan secara seri, sehingga ketika salah satu dari mereka bertindak sebagai kutub N, yang lain bertindak sebagai kutub S. Dengan demikian ada tiga sirkuit stator independen, atau fase, dan masing-masing dapat disuplai dengan arus searah dari sirkuit drive (tidak ditunjukkan pada Gambar 9.5).



Gambar 9.5 Prinsip operasi 30° per langkah variabel keengganan melangkah motor

Ketika fase A diberi energi (seperti yang ditunjukkan oleh garis tebal pada Gambar 9.5 (a)), sebuah Las Magnetik dengan porosnya di sepanjang kutub stator fase A dibuat. Oleh karena itu rotor tertarik ke posisi di mana pasangan kutub rotor dibedakan oleh panah penanda yang sejajar dengan bidang, yaitu sejalan dengan fase fase A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.5 (a). Ketika fase A dimatikan, dan sebaliknya fase B dinyalakan, pasangan kedua kutub rotor akan ditarik ke sejajar dengan kutub stator fase B, rotor bergerak melalui 30° searah jarum jam ke posisi langkah baru, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.5 (b). Langkah searah jarum jam lebih lanjut dari 30° akan terjadi ketika fase B dimatikan dan fase C

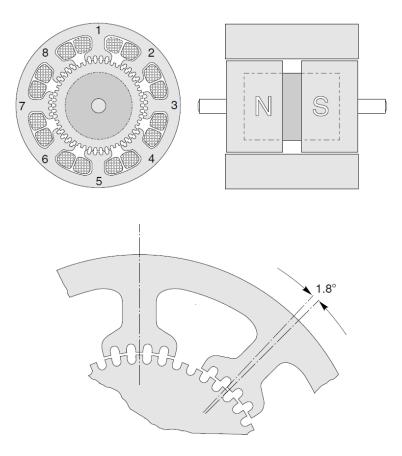
dinyalakan. Pada tahap ini pasangan asli rotor ikut bermain lagi, tetapi kali ini mereka tertarik ke kutub stator C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.5 (c). Dengan menyalakan fase stator berulang dalam urutan ABCA, dll. Rotor akan berputar searah jarum jam dalam 30° langkah, sedangkan jika urutannya adalah ACBA, dll. Ia akan berputar berlawanan arah jarum jam. Mode operasi ini dikenal sebagai 'satu faseon', dan merupakan cara paling sederhana untuk membuat langkah motor. Perhatikan bahwa polaritas arus energi tidak signifikan: motor akan disejajarkan dengan baik terlepas dari arah arus.

Bentuk alternatif motor VR adalah tipe multi-tumpukan, yang terdiri dari beberapa (biasanya tiga) bagian yang bebas magnetis atau 'tumpukan' dalam satu rumahan. Dalam motor tiga-tumpukan rotor akan terdiri dari tiga bagian bergigi terpisah pada poros yang sama, masing-masing memiliki jumlah gigi yang sama, tetapi dengan gigi pada setiap bagian digantikan oleh sepertiga dari pitch gigi dari tetangganya. Stator juga memiliki tiga tumpukan terpisah yang masing-masing mirip stator motor hibrida (lihat Gambar 9.6), dengan gigi pada setiap tiang stator memiliki nada yang sama dengan gigi rotor. Tiga tumpukan stator memiliki gigi yang sejajar, dan setiap stator memiliki belitan, yang menggairahkan semua kutubnya.

Untuk operasi satu-fase-aktif, setiap stator diberi energi secara berurutan, sehingga gigi rotor masing-masing ditarik sejajar dengan gigi stator. Langkah terjadi karena rangkaian gigi rotor yang berurutan selaras dengan satu langkah. Perbedaan utama dibandingkan dengan motor VR single-stack (lihat Gambar 9.5) adalah bahwa semua gigi rotor pada salah satu stack berkontribusi terhadap torsi ketika stack tertentu diberi energi. Pemanfaatan material secara keseluruhan tidak lebih baik dari jenis singlestack, karena hanya sepertiga dari material yang diberi energi pada suatu waktu.

Motor hibrida

Pandangan penampang motor hybrid 1,88 tipikal ditunjukkan pada Gambar 9.6. Stator memiliki delapan tiang utama, masing-masing dengan lima gigi, dan masing-masing tiang utama membawa gelung sederhana. Rotor memiliki dua tutup ujung baja, masing-masing dengan 50 gigi, dan dipisahkan oleh magnet permanen.



Gambar 1.6 Hibrid (200 langkah per revolusi) motor pijakan. Detailnya menunjukkan keberpihakan gigi rotor dan stator, dan menunjukkan sudut langkah 1.8°



Pelat 1.2 Rotor ukuran 34 (diameter 3,4 inci atau 8 cm) motor melangkah 3-stack hybrid 1.8°. Dimensi tutup-ujung rotor dan magnet permanen yang terkait secara aksial dioptimalkan untuk versi tumpukan tunggal. Torsi ekstra diperoleh dengan menambahkan tumpukan kedua atau ketiga, stator cukup diregangkan untuk mengakomodasi rotor yang lebih panjang. (Foto oleh Astrosyn)



Plat 1.3 Ukuran 11 (1.1 inci) motor hybrid. (Foto oleh Astrosyn)

Gigi rotor memiliki nada yang sama dengan gigi pada kutub stator, dan diatur sedemikian rupa sehingga garis tengah gigi pada satu ujung tutup bertepatan dengan slot pada ujung lainnya. Magnet permanen secara magnetis bersifat aksial, sehingga satu set gigi rotor diberi polaritas N, dan yang lainnya polaritas S.

Ketika tidak ada arus yang mengalir di belitan, satu-satunya sumber fluks magnetik melintasi celah udara adalah magnet permanen. Fluks magnet melintasi celah udara dari tutup ujung N ke kutub stator, mengalir secara aksial di sepanjang tubuh stator, dan kembali ke magnet dengan melintasi celah udara ke tutup ujung S. Jika tidak ada offset antara dua set gigi rotor, akan ada torsi penyelarasan periodik yang kuat ketika rotor diputar, dan setiap kali satu set gigi stator sejajar dengan gigi rotor, kita akan mendapatkan posisi kesetimbangan yang stabil. Namun, ada offset, dan ini menyebabkan torsi pelurusan karena magnet hampir dihilangkan. Dalam praktiknya, torsi 'detent' kecil tetap ada, dan ini dapat dirasakan jika poros diputar ketika motor dihilangkan energi: motor cenderung dipegang pada posisi langkahnya oleh torsi detent. Ini kadang-kadang sangat berguna: misalnya, biasanya cukup untuk menahan stasioner rotor ketika daya dimatikan, sehingga motor dapat dibiarkan semalaman tanpa takut akan secara tidak sengaja didorong ke posisi baru.

Kedelapan kumparan terhubung untuk membentuk dua belitan fase. Kumparan pada kutub 1, 3, 5 dan 7 membentuk fase A, sedangkan yang pada 2, 4, 6 dan 8 membentuk fase B. Ketika fase A membawa kutub stator arus positif 1 dan 5 bermagnetisasi sebagai S, dan kutub 3 dan 7 menjadi N. Gigi offset pada ujung N rotor tertarik ke kutub 1 dan 5 sedangkan gigi offset di ujung S rotor tertarik sejajar dengan gigi pada kutub 3 dan 7. Untuk membuat langkah rotor, fase A dimatikan, dan fase B diberi energi dengan arus

positif atau arus negatif, tergantung pada rasa rotasi yang diperlukan. Ini akan menyebabkan rotor bergerak dengan seperempat pitch gigi (1.8°) ke posisi (langkah) keseimbangan baru.

Motor terus melangkah dengan memberi energi pada fase dalam urutan + A, -B, -A, + B, + A (searah jarum jam) atau + A, + B, -A, -B, + A (berlawanan arah jarum jam). Dari sini akan menjadi jelas bahwa pasokan bipolar diperlukan (yaitu yang dapat memberi + ve atau -ve saat ini). Ketika motor dioperasikan dengan cara ini disebut sebagai 'dua fase, dengan pasokan bipolar'.

Jika pasokan bipolar tidak tersedia, pola energi kutub yang sama dapat dicapai dengan cara yang berbeda, selama gulungan motor terdiri dari dua kumparan yang identik ('luka bifilar'). Untuk menarik kutub 1 utara, arus positif dimasukkan ke dalam satu set kumparan fase A. Tetapi untuk menarik kutub 1 selatan, arus positif yang sama diumpankan ke set lain dari kumparan fase A, yang memiliki rasa belitan yang berlawanan. Secara total, kemudian ada empat belitan terpisah, dan ketika motor dioperasikan dengan cara ini disebut sebagai '4-fase, dengan suplai unipolar'. Karena setiap belitan hanya menempati setengah dari ruang, MMF masing-masing belitan hanya setengah dari belitan penuh, sehingga keluaran yang diberi nilai termal jelas berkurang dibandingkan dengan operasi bipolar (yang digunakan untuk keseluruhan belitan).

Kami akhiri bagian ini pada motor hibrida dengan komentar untuk mengidentifikasi belitan, dan peringatan. Jika detail motor tidak diketahui, biasanya mungkin untuk mengidentifikasi gulungan bifilar dengan mengukur resistansi dari yang umum ke kedua ujungnya. Jika motor dimaksudkan hanya untuk penggerak unipolar, satu ujung dari masing-masing belitan dapat digunakan di dalam casing; misalnya, motor unipolar 4 fase mungkin hanya memiliki sadapan Wve, satu untuk setiap fase dan satu yang umum. Kabel juga biasanya diberi kode warna untuk menunjukkan lokasi belitan; misalnya, belitan bifilar pada satu set kutub akan memiliki satu ujung merah, ujung lainnya merah dan putih dan putih umum. Akhirnya, tidak disarankan untuk melepas rotor dari motor hybrid karena mereka bermagnet in situ: pelepasan biasanya menyebabkan pengurangan 5-10% dalam fluks magnet, dengan pengurangan torsi statis yang sesuai pada arus pengenal.

Summary

Konstruksi motor loncatan sederhana, satu-satunya bagian yang bergerak adalah rotor, yang tidak memiliki belitan, komutator atau sikat: karena itu kuat dan dapat diandalkan. Rotor dipegang pada posisi langkahnya semata-mata oleh aksi fluks magnet antara stator dan rotor. Sudut langkah adalah properti dari geometri gigi dan susunan belitan stator, dan oleh karena itu pelubangan dan perakitan laminasi stator dan rotor

diperlukan untuk memastikan bahwa posisi langkah yang berdekatan ditempatkan dengan jarak yang sama. Namun, kesalahan apa pun karena meninju yang tidak akurat akan menjadi non-kumulatif.

Sudut langkah diperoleh dari ekspresi

Step angle =
$$\frac{360^{\circ}}{\text{(gigi rotor)} \times \text{(fase stator)}}$$

Motor VR pada Gambar 9.5 memiliki empat gigi rotor, tiga belitan fase stator dan oleh karena itu sudut langkahnya 30° , seperti yang telah ditunjukkan. Juga harus jelas dari persamaan mengapa motor sudut kecil selalu harus memiliki sejumlah besar gigi rotor. Mungkin motor yang paling banyak digunakan adalah 200 langkah per revolusi tipe hybrid (lihat Gambar 9.6). Ini memiliki rotor 50 gigi, stator 4 fase, dan karenanya sudut langkah 1.8° (= $360^{\circ}/(50 \times 4)$).

Besarnya torsi pelurus jelas tergantung pada besarnya arus dalam belitan fase. Namun, posisi keseimbangan itu sendiri tidak tergantung pada besarnya arus, karena itu hanyalah posisi di mana gigi rotor dan stator berada dalam barisan. Properti ini menggarisbawahi sifat digital dari motor loncatan.

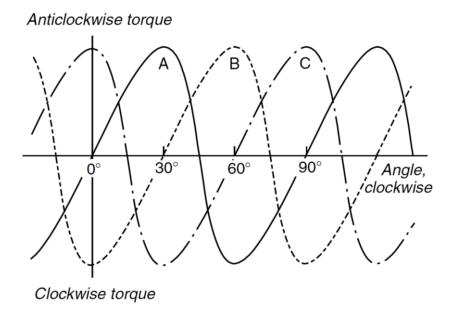
KARAKTERISTIK MOTOR

Kurva torsi-perpindahan statis

Dari pembahasan sebelumnya, harus jelas bahwa bentuk kurva torsi-perpindahan, dan khususnya torsi statis puncak, akan tergantung pada desain elektromagnetik internal rotor. Khususnya bentuk rotor dan gigi stator, dan disposisi belitan stator (dan magnet permanen) harus dioptimalkan untuk mendapatkan torsi statis maksimum.

Kami sekarang beralih ke kurva torsi-perpindahan statis khas, dan melihat bagaimana hal itu menentukan perilaku motorik. Beberapa aspek akan dibahas, termasuk penjelasan tentang langkah dasar (yang telah dilihat secara kualitatif); pengaruh torsi beban terhadap akurasi posisi langkah; efek amplitudo dari arus berliku; dan operasi setengah langkah dan mini-stepping. Demi kesederhanaan, diskusi akan didasarkan pada 30° per langkah motor VR 3-fase yang diperkenalkan sebelumnya, tetapi kesimpulan yang dicapai berlaku untuk motor melangkah apa pun.

Kurva torsi-perpindahan statis khas untuk 3 fase 30° per langkah motor VR ditunjukkan pada Gambar 9.7. Ini menunjukkan torsi yang harus diterapkan untuk memindahkan rotor dari posisi sejajar.



Gambar 1.7 statis kurva torsi-perpindahan untuk 30° per step variable reluctance stepping motor

Karena simetri rotor-stator, besarnya torsi pemulih ketika rotor dipindahkan oleh sudut yang diberikan dalam satu arah sama dengan besarnya torsi pemulih ketika dipindahkan oleh sudut yang sama di arah lain, tetapi tanda sebaliknya.

Ada tiga kurva pada Gambar 1.7, satu untuk masing-masing dari tiga fase, dan untuk setiap kurva kita mengasumsikan bahwa belitan fase yang relevan membawa arus penuh (terukur). Jika arus kurang dari nilai, torsi puncak akan berkurang, dan bentuk kurva cenderung agak berbeda. Konvensi yang digunakan pada Gambar 9.7 adalah bahwa perpindahan rotor searah jarum jam sesuai dengan gerakan ke kanan, sementara torsi positif cenderung menggerakkan rotor berlawanan arah jarum jam.

Ketika hanya satu fase, katakanlah A, diberi energi, dua fase lainnya tidak menghasilkan torsi, sehingga kurva mereka dapat diabaikan dan kita dapat memusatkan perhatian pada garis padat pada Gambar 1.7. Posisi keseimbangan yang stabil (untuk fase A tereksitasi) ada di $\theta=0^{\circ}$, 90°, 180°, dan 270°. Mereka adalah posisi yang stabil (langkah) karena setiap upaya untuk memindahkan rotor menjauh dari mereka akan ditentang oleh torsi penangkal atau pemulihan. Titik-titik ini sesuai dengan posisi di mana kutub rotor berturut-turut (yang terpisah 90°) disejajarkan dengan kutub stator fase A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5 (a). Ada juga empat posisi keseimbangan yang tidak stabil, (at $\theta=45^{\circ}$, 135°, 225° dan 315°) di mana torsi juga nol. Ini sesuai dengan posisi rotor di mana kutub stator berada di tengah-tengah antara dua kutub rotor, dan mereka tidak stabil karena jika rotor dibelokkan sedikit di kedua arah, itu akan dipercepat ke arah yang sama hingga mencapai posisi stabil berikutnya. Jika rotor bebas berputar, maka rotor akan selalu berada di salah satu dari empat posisi stabil.

Stepper-Tunggal (Single-stepping)

Jika kita mengasumsikan bahwa fase A diberi energi, dan rotor diam di posisi $\theta = 0^{\circ}$ (lihat Gambar 9.7) kita tahu bahwa jika kita ingin melangkah ke arah searah jarum jam, fase harus diberi energi dalam urutan ABCA, dll. ..., jadi kita sekarang dapat membayangkan bahwa fase A dimatikan, dan fase B diberi energi sebagai gantinya. Kita juga akan mengasumsikan bahwa peluruhan arus dalam fase A dan penumpukan dalam fase B berlangsung sangat cepat, sebelum rotor bergerak secara signifikan.

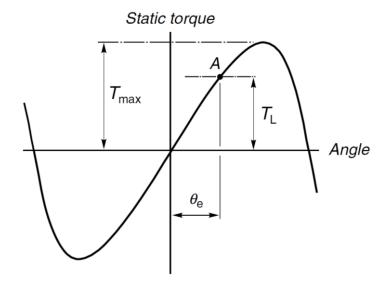
Rotor akan berputar sendiri pada $\theta=0^\circ$, tetapi sekarang akan mengalami torsi searah jarum jam (lihat Gambar 9.7) yang dihasilkan oleh fase B. Oleh karena itu, rotor akan mempercepat searah jarum jam, dan akan terus mengalami torsi searah jarum jam, hingga mencapai 30°. Rotor akan berakselerasi setiap saat, dan karena itu akan melampaui posisi 30°, yang tentu saja posisi target (langkah) untuk fase B. Namun, segera setelah melampaui, torsi berbalik, dan rotor mengalami torsi pengereman, yang membuatnya beristirahat sebelum mempercepatnya kembali ke posisi 30°. Jika tidak ada gesekan atau penyebab redaman lainnya, rotor akan terus berosilasi; tetapi dalam praktiknya ia berhenti pada posisi barunya dengan cukup cepat dengan cara yang sama seperti sistem orde kedua yang teredam. Langkah 30° berikutnya dicapai dengan cara yang sama, dengan mematikan arus dalam fase B, dan beralih pada fase C.

Dalam diskusi di atas, kami telah mengakui bahwa rotor bekerja secara berurutan oleh masing-masing dari tiga kurva torsi terpisah yang ditunjukkan pada Gambar 9.7. Atau, karena tiga kurva memiliki bentuk yang sama, kita dapat membayangkan rotor dipengaruhi oleh kurva torsi tunggal, yang 'melompat' dengan satu langkah (30° dalam kasus ini) setiap kali arus dialihkan dari satu fase ke fase berikutnya. Ini sering kali merupakan cara paling mudah untuk memvisualisasikan apa yang terjadi pada motor.

Kesalahan posisi step dan menahan torsi

Dalam diskusi sebelumnya, torsi beban diasumsikan nol, dan oleh karena itu rotor dapat beristirahat dengan kutubnya persis sejajar dengan kutub stator tereksitasi. Ketika torsi beban hadir, rotor tidak akan dapat menarik sepenuhnya ke penyelarasan, dan 'kesalahan posisi langkah' tidak akan terhindarkan. Asal dan tingkat kesalahan posisi langkah dapat dihargai dengan bantuan kurva torsi-perpindahan khas yang ditunjukkan pada Gambar 1.8. Posisi langkah yang sebenarnya adalah pada asal pada gambar, dan ini adalah tempat rotor akan beristirahat tanpa adanya torsi beban. Jika kita membayangkan rotor pada awalnya berada pada posisi ini, dan kemudian mempertimbangkan bahwa beban searah jarum jam ($T_{\rm L}$) diterapkan, rotor

akan bergerak searah jarum jam, dan ketika hal itu terjadi maka akan semakin berkembang torsi yang berlawanan arah jarum jam.



Gambar 1.8 Kurva torsi-sudut statis yang menunjukkan kesalahan posisi langkah (θ_e) yang dihasilkan dari torsi T

Posisi kesetimbangan akan tercapai ketika torsi motor sama dan berlawanan dengan torsi beban, yaitu pada titik A pada Gambar 1.8. Perpindahan sudut yang sesuai dari posisi step (θ_e pada Gambar 9.8) adalah kesalahan posisi step.

Adanya kesalahan posisi langkah adalah salah satu kelemahan dari step motor. Perancang motor berusaha untuk mengatasi masalah dengan bertujuan untuk menghasilkan kurva torsi-sudut curam di sekitar posisi langkah, dan pengguna harus menyadari masalah tersebut dan memilih motor dengankurva cukup curam untuk menjaga kesalahan dalam batas yang dapat diterima. Dalam beberapa kasus ini mungkin berarti memilih motor dengan torsi puncak yang lebih tinggi daripada yang seharusnya diperlukan, hanya untuk mendapatkan kurva torsi-sudut yang cukup curam di sekitar posisi langkah.

Selama torsi beban kurang dari T_{max} (lihat Gambar 9.8), posisi istirahat yang stabil diperoleh, tetapi jika torsi beban melebihi T_{max} , rotor tidak akan mampu menahan posisi langkahnya. Karena itu Tmax dikenal sebagai torsi 'holding'. Nilai torsi holding segera menyampaikan gagasan tentang kemampuan keseluruhan motor apa pun, dan itu - setelah sudut langkah - parameter tunggal yang paling penting, yang dicari dalam memilih motor. Seringkali, kata sifat 'holding' dijatuhkan sama sekali: misalnya 'motor 1-Nm' dipahami sebagai motor dengan torsi statis puncak (holding torque) 1 Nm.

Half stepping

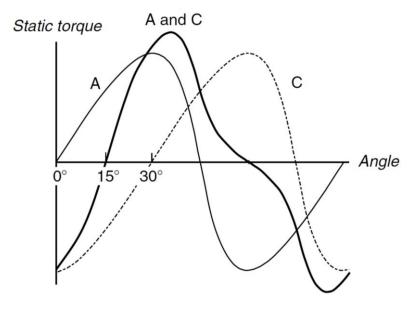
Kita telah melihat bagaimana menginjak motor dalam peningkatan 30° dengan memberi energi fase satu per satu dalam urutan ABCA, dll. Meskipun mode 'satu fase ini' adalah yang paling sederhana dan paling banyak digunakan, ada dua mode lainnya. , yang juga sering digunakan. Ini disebut sebagai mode 'dua fase aktif' dan mode 'setengah melangkah'. Twophase-on dapat memberikan torsi penahan yang lebih besar dan respons step-step teredam yang jauh lebih baik daripada mode satu fase-on; dan mode setengah melangkah memungkinkan sudut langkah efektif untuk dibelah dua - dengan demikian menggandakan resolusi - dan menghasilkan rotasi poros yang lebih halus.

Dalam mode dua fase aktif, dua fase bersemangat secara bersamaan. Ketika fase A dan B diberi energi, misalnya, rotor mengalami torsi dari kedua fase, dan berhenti di titik tengah di antara dua posisi langkah penuh yang berdekatan. Jika fase diaktifkan dalam urutan AB, BC, CA, AB, dll., Motor akan mengambil langkah-langkah penuh (30°), seperti dalam mode satu fase aktif, tetapi posisi keseimbangannya akan disisipkan di antara full step posisi.

Untuk mendapatkan 'setengah melangkah', fase-fase tersebut bersemangat dalam urutan A, AB, B, BC, dll., Yaitu secara bergantian dalam mode satu-fase-aktif dan dua-fase-aktif. Ini kadang-kadang dikenal sebagai eksitasi 'gelombang', dan itu menyebabkan rotor untuk maju dalam langkah 15°, atau setengah dari sudut langkah penuh. Seperti yang mungkin diharapkan, setengah melangkah terus menerus biasanya menghasilkan rotasi poros lebih halus daripada melangkah penuh, dan juga menggandakan resolusi.

Kita dapat melihat seperti apa kurva torsi statis ketika dua fase tereksitasi oleh superposisi kurva fase individu. Contoh ditunjukkan pada Gambar 1.9, dari mana dapat dilihat bahwa untuk mesin ini, torsi penahan (yaitu torsi statis puncak) lebih tinggi dengan dua fase tereksitasi daripada dengan hanya satu tereksitasi. Posisi keseimbangan stabil (setengah steps) adalah pada 15°, seperti yang diharapkan. Harga yang harus dibayar untuk torsi holding yang meningkat adalah peningkatan disipasi daya pada belitan, yang dua kali lipat dibandingkan dengan mode satu fase. Torsi penahan meningkat dengan faktor kurang dari dua, sehingga torsi per watt (yang merupakan angka manfaat) berkurang.

Sebuah kata hati-hati diperlukan sehubungan dengan penambahan dua kurva torsi satu fasa-on yang terpisah untuk mendapatkan kurva dua fasa-on. Secara ketat, prosedur semacam itu hanya berlaku di mana kedua fase secara magnetis tidak tergantung, atau bagian umum dari sirkuit magnetik tidak jenuh. Ini bukan kasus di kebanyakan motor, di mana fase berbagi sirkuit magnetik umum, yang beroperasi di bawah kondisi sangat jenuh. Oleh karena itu penambahan langsung kurva satu fase-on tidak dapat diharapkan untuk memberikan hasil yang akurat untuk kurva dua fase-on, tetapi mudah dilakukan, dan memberikan perkiraan yang masuk akal.



Gambar 1.9 Kurva torsi-sudut statis (garis tebal) yang sesuai dengan eksitasi dua fase

Terlepas dari torsi penahan yang lebih tinggi dalam mode dua fase aktif, ada perbedaan penting lainnya yang membedakan perilaku statis dari mode satu fase aktif. Dalam mode satu fase aktif, kesetimbangan atau posisi langkah ditentukan semata-mata oleh geometri rotor dan stator: mereka adalah posisi di mana rotor dan stator berada dalam garis. Namun, dalam mode dua fase aktif, rotor dimaksudkan untuk beristirahat pada titik di mana kutub rotor berjejer di tengah-tengah antara kutub stator. Posisi ini tidak terlalu tajam oleh 'tepi' kutub yang berseberangan, seperti dalam satu fase pada kasus; dan posisi sisanya hanya akan tepat di tengah jalan jika (a) ada simetri geometris yang tepat dan, yang lebih penting (b) kedua arus identik. Jika salah satu arus fasa lebih besar dari yang lain, rotor akan lebih dekat ke fase dengan arus yang lebih tinggi, alih-alih setengah jalan antara keduanya. Kebutuhan untuk menyeimbangkan arus untuk mendapatkan setengah loncatan yang tepat jelas merupakan kelemahan skema ini. Namun, secara paradoks, sifat-sifat mesin dengan arus fasa yang tidak sama kadang-kadang dapat diubah menjadi efek yang baik, seperti yang kita lihat sekarang.

Step division – mini-stepping

Ada beberapa aplikasi (misalnya dalam pencetakan dan pengaturan foto) di mana resolusi sangat diperlukan, dan motor dengan sudut langkah yang sangat kecil - mungkin hanya sebagian kecil dari derajat - diperlukan. Anda sudah melihat bahwa sudut langkah hanya dapat dibuat kecil dengan menambah jumlah gigi rotor dan / atau jumlah fase, tetapi dalam praktiknya tidak nyaman untuk memiliki lebih dari empat atau lima fase, dan sulit untuk membuat rotor dengan lebih dari 50-100 gigi. Ini berarti jarang bagi motor

untuk memiliki sudut langkah di bawah sekitar 18. Ketika sudut langkah yang lebih kecil diperlukan teknik yang dikenal sebagai mini-stepping (atau step division) digunakan.

Mini-stepping adalah teknik yang didasarkan pada operasi dua fase yang menyediakan pembagian setiap langkah motor penuh menjadi sejumlah 'substeps' dengan ukuran yang sama. Berbeda dengan setengah melangkah, di mana kedua arus harus dijaga tetap sama, arus tersebut sengaja dibuat tidak merata. Dengan memilih dan mengendalikan amplitudo relatif dari arus dengan benar, posisi keseimbangan rotor dapat dibuat untuk diletakkan di mana saja di antara posisi langkah untuk masing-masing dari dua fase terpisah.

Kontrol arus loop tertutup diperlukan untuk mencegah perubahan arus akibat perubahan suhu pada belitan, atau variasi tegangan suplai; dan jika perlu untuk memastikan bahwa torsi holding tetap konstan untuk setiap ministep kedua arus harus diubah sesuai dengan algoritma yang ditentukan. Meskipun kesulitan yang disebutkan di atas, loncatan mini digunakan secara luas, terutama dalam aplikasi fotografi dan pencetakan di mana resolusi tinggi diperlukan. Skema yang melibatkan antara 3 dan 10 ministeps untuk motor langkah 1.8° banyak, dan ada contoh di mana hingga 100 ministeps (20 000 ministeps / rev) telah berhasil dicapai.

Sejauh ini, kami telah berkonsentrasi pada aspek-aspek perilaku, yang hanya bergantung pada motor itu sendiri, yaitu kinerja statis. Bentuk kurva torsi statis, torsi memegang dan kemiringan kurva torsi tentang posisi langkah semuanya telah terbukti menjadi petunjuk penting tentang cara motor dapat diharapkan untuk melakukan. Semua karakteristik ini tergantung pada arus (s) di belitan, bagaimanapun, dan ketika motor berjalan arus seketika akan tergantung pada jenis sirkuit penggerak yang digunakan, seperti dibahas dalam dua bagian berikutnya.

KARAKTERISTIK IDEAL STEADY-STATE DRIVE (ARUS KONSTAN)

Pada bagian ini, kita akan melihat bagaimana motor akan bekerja jika dipasok oleh sirkuit penggerak yang ideal, yang ternyata merupakan salah satu yang mampu memasok pulsa arus persegi panjang ke setiap belitan saat diperlukan, dan terlepas dari tingkat stepping. Karena induktansi belitan, tidak ada sirkuit drive nyata yang dapat mencapai ini, tetapi yang paling canggih (dan mahal) mencapai operasi yang ideal hingga tingkat stepping yang sangat tinggi.

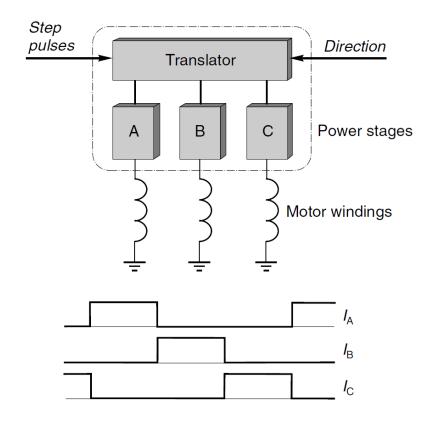
Persyaratan Kemudi (drive)

Fungsi dasar dari drive lengkap adalah untuk mengubah sinyal input perintah langkah ke dalam pola arus yang sesuai dalam belitan motor. Ini dicapai dalam dua tahap berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.10, yang berhubungan dengan motor 3 fasa.

Tahap 'penerjemah' melatih mengubah pulsa perintah masuk yang masuk ke dalam urutan perintah hidup / mati ke masing-masing dari tiga tahap kekuatan. Dalam mode satu fase aktif, misalnya, pulsa perintah langkah pertama akan dialihkan untuk mengaktifkan fase A, yang kedua akan mengaktifkan fasa B dan seterusnya. Dalam drive yang sangat sederhana, penerjemah mungkin hanya akan menyediakan satu mode operasi (mis. Satu fase aktif), tetapi sebagian besar drive komersial memberikan opsi satu fasa aktif, dua fasa aktif dan setengah loncatan. IC chip tunggal dengan tiga mode operasi ini dan dengan output tiga fasa dan empat fasa sudah tersedia.

Tahap daya (satu per fasa) memasok arus ke belitan. Keragaman tipe yang sangat besar sedang digunakan, mulai dari yang sederhana dengan satu transistor switching per fase, hingga rangkaian tipe helikopter yang rumit dengan empat transistor per fase, dan beberapa di antaranya dibahas dalam Bagian 1.5. Namun, pada titik ini, sangat membantu untuk membuat daftar fungsi-fungsi yang diperlukan dari power stage 'ideal'. Ini adalah pertama bahwa ketika penerjemah meminta fase untuk diberi energi, arus penuh (terukur) harus ditetapkan segera; kedua, arus harus dijaga konstan (pada nilai pengenalnya) selama durasi periode 'on' dan akhirnya, ketika penerjemah meminta agar arus dimatikan, arus harus segera dikurangi menjadi nol.

Bentuk gelombang saat ini yang ideal untuk melangkah terus menerus dengan operasi onephase ditunjukkan pada bagian bawah Gambar 1.10. Arus memiliki profil bujur sangkar karena hal ini mengarah pada nilai optimal torsi yang berjalan dari motor. Tetapi karena induktansi belitan, tidak ada drive nyata yang akan mencapai bentuk gelombang arus ideal, meskipun banyak drive mendekati ideal, bahkan pada tingkat stepping yang cukup tinggi. Drive yang menghasilkan bentuk gelombang persegi panjang seperti itu (tidak mengherankan) disebut drive arus konstan. Kita sekarang melihat torsi berjalan yang dihasilkan oleh motor ketika dioperasikan dari penggerak arus konstan yang ideal. Ini akan bertindak sebagai tolok ukur untuk menilai kinerja drive lain, yang semuanya akan terlihat memiliki kinerja yang lebih rendah.



Gambar 1.10 Pengaturan umum sistem drive untuk motor 3-fase, dan arus belitan yang sesuai dengan drive 'ideal'

Pull-out torsi dalam kondisi arus konstan

Jika arus fasa dianggap ideal, yaitu mereka dinyalakan dan dimatikan seketika, dan tetap pada nilai nilai penuhnya selama setiap periode 'on', kita dapat menggambarkan sumbu medan magnet yang akan bergerak maju di sekitar mesin dalam serangkaian langkah, rotor didorong untuk mengikutinya dengan torsi keengganan. Jika kita mengasumsikan bahwa inersia cukup tinggi untuk fluktuasi kecepatan rotor menjadi sangat kecil, rotor akan berputar pada laju konstan, yang sesuai persis dengan laju stepping.

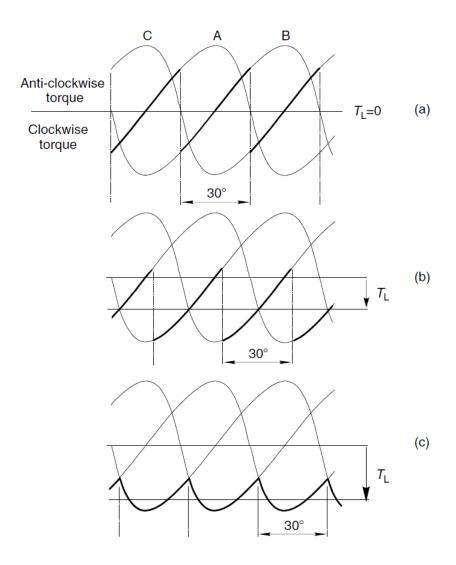
Sekarang jika kita mempertimbangkan situasi di mana posisi sumbu rotor, rata-rata, tertinggal di belakang sumbu medan maju, harus jelas bahwa, rata-rata, rotor akan mengalami torsi penggerak. Semakin tertinggal, semakin tinggi torsi maju rata-rata yang bekerja padanya, tetapi hanya sampai titik tertentu. Kita sudah tahu bahwa jika sumbu rotor dipindahkan terlalu jauh dari sumbu medan, torsi akan mulai berkurang, dan akhirnya berbalik, jadi kami menyimpulkan bahwa meskipun lebih banyak torsi akan dikembangkan dengan meningkatkan sudut jeda rotor, akan ada batas sejauh mana ini bisa diambil.

Beralih sekarang ke pemeriksaan kuantitatif torsi pada rotor, kita akan memanfaatkan kurva torsiperpindahan statis yang dibahas sebelumnya, dan melihat apa yang terjadi ketika beban pada poros bervariasi, laju langkah dijaga konstan. Rotasi searah jarum jam akan dipelajari, sehingga fase akan diberi energi dalam urutan ABC. Torsi sesaat pada rotor dapat dicapai dengan mengenali (a) bahwa kecepatan rotor konstan, dan itu mencakup sudut satu langkah (30°) antara pulsa perintah langkah, dan (b) rotor akan 'ditindaklanjuti' secara berurutan oleh masing-masing set kurva torsi.

Ketika torsi beban nol, torsi bersih yang dikembangkan oleh rotor harus nol (terlepas dari torsi sangat kecil yang diperlukan untuk mengatasi gesekan). Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 1.11 (a). Torsi sesaat ditunjukkan oleh garis tebal, dan jelas bahwa setiap fase pada gilirannya memberikan torsi searah jarum jam, kemudian torsi berlawanan arah jarum jam sementara sudut rotor berputar melalui 30°. Torsi rata-rata adalah nol, sama dengan torsi beban, karena sudut lag rotor rata-rata adalah nol.

Ketika torsi beban pada poros meningkat, efek langsungnya adalah menyebabkan rotor jatuh kembali sehubungan dengan medan. Ini menyebabkan torsi searah jarum jam meningkat, dan torsi berlawanan arah jarum jam menurun. Kesetimbangan tercapai ketika sudut jeda telah meningkat cukup untuk torsi motor untuk sama dengan torsi beban. Torsi yang dikembangkan pada kondisi beban menengah seperti ini ditunjukkan oleh garis tebal pada Gambar 1.11 (b).

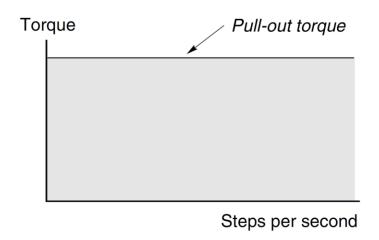
Torsi rata-rata tertinggi yang mungkin dapat dikembangkan ditunjukkan oleh garis tebal pada Gambar 1.11 (c): jika torsi beban melebihi nilai ini (yang dikenal sebagai torsi tarik-keluar) motor kehilangan sinkronisme dan warung, dan vital korespondensi satu-ke-satu antara pulsa dan langkah-langkah hilang.



Gambar 1.11 Kurva torsi statis yang menunjukkan bagaimana torsi steady-state rata-rata (TL) dikembangkan selama operasi frekuensi konstan

Karena kita telah mengasumsikan penggerak arus konstan yang ideal, torsi tarikan akan terlepas dari laju loncatan, dan oleh karena itu kurva torsi tarikan kecepatan di bawah kondisi ideal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.12. Daerah yang diarsir mewakili wilayah operasi yang diizinkan: pada kecepatan tertentu (stepping rate) torsi beban dapat memiliki nilai apa pun hingga torsi tarik keluar, dan motor akan terus berjalan pada kecepatan yang sama. Tetapi jika torsi beban melebihi torsi pull-out, motor akan tiba-tiba menarik keluar dari sinkronisme dan stall.

Seperti yang disebutkan sebelumnya, tidak ada drive nyata yang dapat memberikan bentuk gelombang arus ideal, jadi sekarang kita beralih untuk melihat secara singkat pada tipe drive yang umum digunakan, dan karakteristik kecepatan-torsi tarikan-keluarnya.



Gambar 1.12 Wilayah pengoperasian steady-state dengan drive arus konstan ideal. (Dalam keadaan ideal seperti itu tidak akan ada batas untuk laju loncatan, tetapi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.14, sirkuit drive nyata memaksakan batas atas)

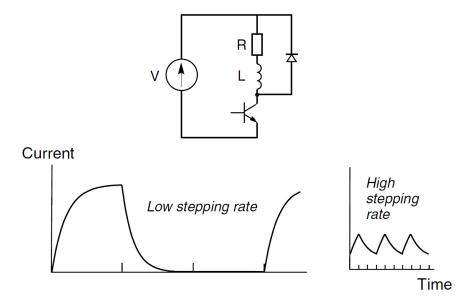
RANGKAIAN DRIVE DAN KURVA TORSI-KECEPATAN PULL-OUT

Pengguna sering menemukan kesulitan dalam menerima kenyataan bahwa kinerja menjalankan motor melangkah sangat tergantung pada jenis sirkuit drive yang digunakan. Karena itu penting untuk menekankan bahwa untuk memenuhi spesifikasi, akan selalu perlu untuk mempertimbangkan motor dan berkendara bersama, sebagai sebuah paket. Ada tiga jenis drive yang biasa digunakan. Semua menggunakan transistor, yang dioperasikan sebagai sakelar, mis. Keduanya dinyalakan sepenuhnya, atau terputus. Deskripsi singkat dari masing-masing diberikan di bawah ini, dan pro dan kontra dari masing-masing jenis ditunjukkan. Untuk menyederhanakan diskusi, kami akan mempertimbangkan satu fase dari motor VR 3 fase dan mengasumsikan bahwa itu dapat diwakili oleh rangkaian seri R – L sederhana di mana R dan L adalah resistansi dan induktansi sendiri dari belitan, masing-masing. (Dalam praktiknya induktansi akan bervariasi dengan posisi rotor, sehingga menimbulkan gerakan emf pada belitan, yang, seperti yang telah kita lihat sebelumnya dalam buku ini, adalah manifestasi tak terhindarkan dari proses konversi energi elektromekanis. Jika kita perlu menganalisis motor melangkah perilaku sepenuhnya kita harus memasukkan istilah gf motional. Untungnya, kita bisa mendapatkan apresiasi yang cukup baik tentang bagaimana motor berperilaku jika kita memodelkan masing-masing berliku hanya dalam hal resistensi dan induktansi diri.)

Drive Tegangan Konstan

Ini adalah drive yang paling sederhana: sirkuit untuk salah satu dari tiga fase ditunjukkan pada bagian atas Gambar 9.13, dan bentuk gelombang saat ini pada tingkat stepping rendah dan tinggi ditunjukkan di bagian bawah gambar. D.c. tegangan V dipilih sehingga ketika transistor aktif, arus mantap (sama dengan V / R

jika kita mengabaikan penurunan tegangan on-state melintasi transistor) adalah arus pengenal seperti ditentukan oleh pabrikan motor.



Gambar 1.13 Rangkaian dasar kemudi tegangan konstan dan tipikal bentuk gelombang arus

Bentuk gelombang saat ini menampilkan bentuk eksponensial naik yang akrab yang menjadi ciri sistem orde pertama: konstanta waktu adalah L / R, arus mencapai kondisi mantap setelah beberapa konstanta waktu. Ketika transistor dimatikan, energi yang tersimpan dalam induktansi tidak dapat secara instan berkurang menjadi nol, sehingga meskipun arus yang melalui transistor tiba-tiba menjadi nol, arus dalam belitan dialihkan ke jalur tertutup yang dibentuk oleh belitan dan dioda freewheel, dan kemudian meluruh secara eksponensial ke nol, lagi dengan konstanta waktu L / R. Dalam fase ini energi yang tersimpan di medan magnet dihamburkan sebagai panas dalam resistansi belitan dan dioda.

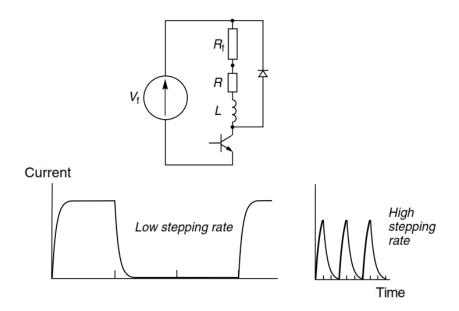
Pada laju loncatan rendah (kecepatan rendah), drive memberikan perkiraan yang cukup baik untuk bentuk gelombang arus empat persegi panjang yang ideal. (Kami sedang mempertimbangkan motor 3-fase, jadi idealnya satu fase harus aktif untuk satu langkah pulsa dan mati untuk dua langkah berikutnya, seperti pada Gambar 9.10.) Tetapi pada frekuensi yang lebih tinggi (gelombang tangan kanan pada Gambar 9.13), di mana Periode 'on' lebih pendek dibandingkan dengan konstanta waktu belitan, bentuk gelombang saat ini mengalami degenerasi, dan tidak seperti bentuk persegi panjang yang ideal. Secara khusus, arus tidak pernah mendekati nilai penuhnya selama pulsa aktif, sehingga torsi selama periode ini berkurang; dan lebih buruk lagi, arus yang cukup besar tetap ada ketika fase seharusnya dimatikan, sehingga selama periode ini fase akan berkontribusi torsi negatif ke rotor. Tidak mengherankan semua ini menghasilkan torsi tarik-keluar yang sangat cepat dengan kecepatan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.16 (a).

Kurva (a) pada Gambar 9.16 harus dibandingkan dengan torsi pull-out pada kondisi arus konstan ideal yang ditunjukkan pada Gambar 9.12 untuk memahami kinerja yang sangat terbatas dari kemudi tegangan konstan sederhana.

Kemudi (drive) Arus-dipaksa

Laju awal dari kenaikan arus dalam rangkaian R-L seri berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sehingga untuk menetapkan arus lebih cepat saat dinyalakan, diperlukan tegangan suplai (V_f) yang lebih tinggi. Tetapi jika kita hanya meningkatkan tegangan, arus kondisi-mapan (steady-state) (V_f/R) akan melebihi arus pengenal dan belitan akan terlalu panas.

Untuk mencegah arus melebihi nilai pengenal, tambahan resistor 'penguat' harus ditambahkan secara seri dengan belitan. Nilai resistansi ini $(R_{\rm f})$ harus dipilih sehingga $V_{\rm f}=(R+R_{\rm f})=I$, di mana I adalah arus pengenal. Ini ditunjukkan di bagian atas Gambar 9114, bersama dengan bentuk gelombang arus pada stapper pengenal rendah dan tinggi. Karena laju naik dan turun arus lebih tinggi, bentuk gelombang arus mendekati lebih dekat ke bentuk persegi panjang yang ideal, terutama pada laju stapper rendah, meskipun pada laju yang lebih tinggi masih jauh dari ideal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.14. Oleh karena itu, torsi pull-out frekuensi rendah dipertahankan ke laju stapper yang lebih tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9116 (b). Nilai untuk $R_{\rm f}$ dari 2 hingga 10 kali resistansi motor (R) adalah umum. Secara garis besar, torsi pull-out yang diberikan akan tersedia pada 10 kali laju stapper jika $R_{\rm f}=10R$, dibandingkan dengan kemudi tegangan konstan itu sendiri.



Gambar 1.14 Kemudi arus-paksa (current-forced) (L/R) dan bentuk gelombang arus khas/tipikal

Beberapa produsen menyebut jenis drive ini sebagai drive 'R/L', sementara yang lain menyebutnya drive 'L/R', atau bahkan hanya 'drive resistor'. Seringkali, set dari kurva torsi-kecepatan pull-out di katalog diberi label dengan nilai R/L (atau L/R) = 5, 10, dll. Ini berarti bahwa kurva berlaku untuk kemudi di mana resistor penguat adalah lima (atau sepuluh) kali resistansi belitan, implikasinya adalah bahwa tegangan kemudi juga telah disesuaikan untuk menjaga arus statis pada nilai pengenalnya. Jelas, itu berarti bahwa semakin tinggi R dibuat, semakin tinggi R daya dari suplai; dan itu adalah R daya yang lebih tinggi yang merupakan alasan utama untuk kinerja torsi-kecepatan ditingkatkan.

Kerugian utama dari drive ini adalah ketidakefisienannya, dan konsekuensinya membutuhkan *rating* catu daya yang tinggi. Sejumlah besar panas dihamburkan dalam resistor penguat, terutama saat motor diam dan arus fasa kontinu, dan pembuangan panas dapat menyebabkan masalah lain dalam penempatan resistor penguat.

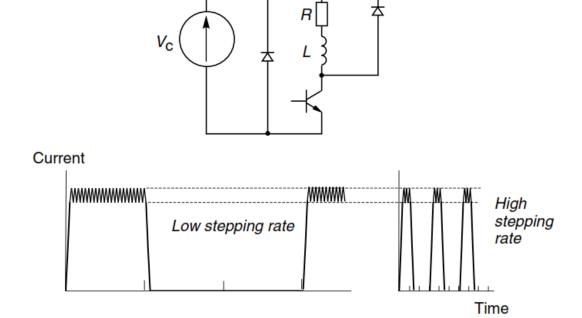
Telah disebutkan sebelumnya bahwa pengaruh gerak e.m.f. di belitan akan diabaikan. Namun, dalam praktiknya, e.m.f. selalu memiliki pengaruh yang nyata pada arus, terutama pada laju stepper yang tinggi, jadi harus diingat bahwa bentuk gelombang yang ditunjukkan pada Gambar 9.13 dan 9.14 hanyalah perkiraan. Tak heran, ternyata e.m.f. cenderung membuat bentuk gelombang arus lebih buruk (dan torsi berkurang) daripada yang disarankan pada diskusi di atas. Oleh karena itu, idealnya, kita membutuhkan kemudi, yang akan menjaga arus konstan sepanjang periode on, terlepas dari e.m.f yang menggerakkan. Drive tipe chopper loop tertutup (di bawah) memberikan perkiraan terdekat dengan ini, dan juga menghindari pemborosan daya, yang merupakan fitur drive R / L.

Kemudi (drive) Chopper

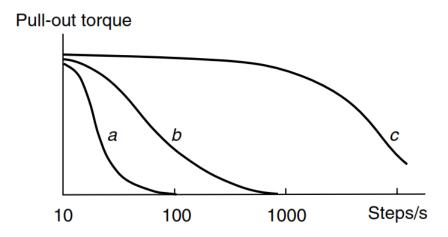
Rangkaian dasar untuk satu fase motor VR ditunjukkan di bagian atas Gambar 1.15 bersama dengan bentuk gelombang arus. Catu daya tegangan tinggi digunakan untuk mendapatkan perubahan arus yang sangat cepat saat fase dinyalakan atau dimatikan. Transistor pada bagian bawah dihidupkan selama periode yang dibutuhkan arus. Transistor bagian atas menyala setiap kali arus sebenarnya turun pada ambang batas bawah (ditunjukkan titik-titik pada Gambar 1.15) dan mati bila arus melebihi ambang atas. Tindakan chopping mengarah ke bentuk gelombang arus yang merupakan pendekatan yang baik sampai ideal (lihat Gambar 1.10). Pada akhir periode on kedua transistor mati dan freewheel arus melalui kedua dioda dan kembali ke suplai. Selama periode ini energi yang disimpan dalam induktansi dikembalikan ke suplai, dan karena tegangan terminal belitan maka menjadi $-V_c$, arus turun secepat ketika arus naik.



Plate 1.4 Penggerak pemotong arus konstan bipolar dengan motor hybrid ukuran 17. Drive serbaguna ini mendapatkan tenaganya dari d.c. supply (antara 24 V dan 80 V) dan arus fasa keluaran dapat diatur (menggunakan resistor pemrograman) ke nilai apa pun dalam kisaran 0,3 A hingga 7 A. Penyesuaian resonansi disediakan. (Foto milik Astrosyn)



Gambar 1.15 Kemudi chopper arus konstan dan bentuk gelombang arus khas/tipikal



Gambar 1.16 Kurva khas/tipikal kecepatan-torsi pull-out untuk motor tertentu dengan jenis rangkaian kemudi yang berbeda. (a) kemudi tegangan konstan; (b) kemudi arus-paksa; (c) kemudi chopper

Karena sistem kontrol arus adalah sistem loop tertutup, distorsi bentuk gelombang arus oleh e.m.f. yang menggerakkan diminimalkan, dan ini berarti bahwa kurva torsi-kecepatan ideal (arus-konstan) diikuti dengan laju stapper yang tinggi. Namun, akhirnya, periode 'on' mereduksi lebih sedikit ke titik di mana dari waktu arus naik, dan arus penuh tidak pernah tercapai. Tindakan chopping kemudian berhenti, kemudi pada dasarnya kembali ke tegangan konstan, dan torsi turun dengan cepat saat laju satpper dinaikkan lebih tinggi, seperti pada Gambar 9.16 (c). Tidak ada keraguan tentang keunggulan keseluruhan dari drive tipe chopper, dan secara bertahap menjadi drive standar. Modul chopper chip-tunggal dapat dibeli untuk motor kecil (katakanlah 1–2A), dan kartu (*cards*) chopper plug-in lengkap, dengan nilai hingga 10A atau lebih tersedia untuk motor yang lebih besar.

Pembahasan di bagian ini berhubungan dengan motor VR, yang pulsa arus unipolar sudah cukup. Jika kita memiliki motor magnet hibrida atau permanen lainnya, kita akan membutuhkan sumber arus bipolar (yaitu yang dapat memberikan arus positif atau negatif), dan untuk ini kita akan menemukan bahwa setiap fasa disuplai dari jembatan-H empat-transistor.

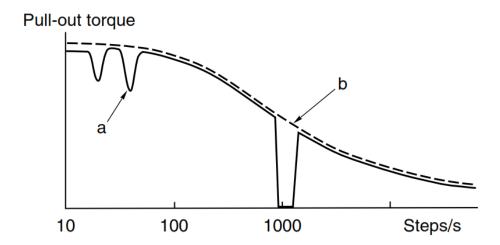
Resonansi dan ketidakstabilan (Resonances and instability)

Dalam praktiknya, kurva torsi-kecepatan yang diukur sering kali menunjukkan penurunan yang parah pada atau di sekitar laju stapper tertentu. Prabrikan tidak tertarik sampai menekankan fitur ini, dan terkadang menghilangkan penurunan dari kurva mereka, jadi sangat penting bagi pengguna untuk memperhatikannya. Tipikal karakteristik yang dipertimbangkan untuk motor hybrid dengan kemudi tegangan-paksa ditunjukkan seperti (a) pada Gambar 9.17. Besarnya dan lokasi dari penurunan torsi sangat bergantung pada

karakteristik motor, kemudi (*drive*), mode operasi, dan beban. Ada dua mekanisme berbeda yang menyebabkan penurunan. Yang pertama adalah masalah 'tipe resonansi' langsung, yang memanifestasikan dirinya pada laju stapper yang rendah, dan berasal dari sifat osilasi dari respons single-step. Sewaktu-waktu laju stapper terjadi pada waktu yang sama dengan frekuensi alami dari osilasi rotor, osilasi dapat ditingkatkan, dan ini dalam mengubah membuatnya lebih mungkin bahwa rotor akan gagal untuk mengikuti medan stapper.

Fenomena kedua terjadi karena pada laju stapper tertentu itu mungkin seluruh sistem motor/kemudi menunjukkan umpan balik positif, dan menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan ini biasanya terjadi pada laju stapper yang relatif tinggi, jauh di atas wilayah 'resonansi' yang dibahas di atas. Penurunan yang dihasilkan dalam kurva torsi-kecepatan sangat sensitif dan melekat terhadap derajat damping yang ada (terutama di bantalan), dan tidak jarang terjadi penurunan yang parah, yang mana terlihat pada hari yang hangat/panas (seperti yang ditunjukkan sekitar 1000 steps per detik pada Gambar 1.17) akan menghilang pada hari yang dingin.

Penurunan paling menonjol selama operasi kondisi-mapan (steady-state), dan mungkin saja keberadaannya tidak serius pada operasi kontinu pada kecepatan yang relevan tidak diperlukan. Dalam kasus ini, seringkali dimungkinkan untuk mempercepat melalui penurunan tetapi tanpa efek yang merugikan. Berbagai teknik kemudi khusus ada untuk menghilangkan resonansi dengan menghaluskan sifat bertahap bidang stator, atau dengan memodulasi frekuensi suplai untuk mengurangi/meredam ketidakstabilan, tetapi solusi paling sederhana dalam operasi loop terbuka adalah dengan memasang peredam ke poros motor.



Gambar 1.17 kurva pull-out torsi-kecepatan untuk motor stepper hybrid yang menunjukkan (kurva a) penurunan resonansi kecepatan rendah dan ketidakstabilan frekuensi menengah sekitar 1000 steps per detik; dan perbaikan dilakukan dengan menambahkan peredam inersia (kurva b)

Damper dari jenis Lanchester atau dari inersia yang digabungkan secara bergandengan (jenis VCID) digunakan. Ini terdiri dari rumahan ringan, yang dipasang dengan kokoh pada poros motor, dan inersia, yang dapat berputar relatif terhadap rumahan. Inersia dan rumahan dipisahkan baik oleh *viscous fluid* (tipe VCID) atau oleh piringan gesekan (tipe Lanchester). Setiap kali kecepatan motor berubah, perakitan menggunakan torsi peredaman, tetapi begitu kecepatan motor stabil, tidak ada penahan torsi dari damper. Dengan memilih peredam yang sesuai, penurunan pada kurva torsi-kecepatan dapat dihilangkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.17 (b). Damper juga sering kali penting untuk meredam respons single-steps, terutama dengan motor VR, yang banyak di antaranya memiliki respons steps berosilasi tinggi. Satu-satunya kelemahan mereka adalah meningkatkan inersia efektif sistem, dan dengan demikian mengurangi akselerasi maksimum.

KINERJA TRANSIEN

Respon Step

Telah ditunjukkan sebelumnya bahwa respons single-steps serupa dengan sistem orde-2 kedua yang teredam. Kita dapat dengan mudah memperkirakan frekuensi normal ω_n dalam rad/s dari persamaan

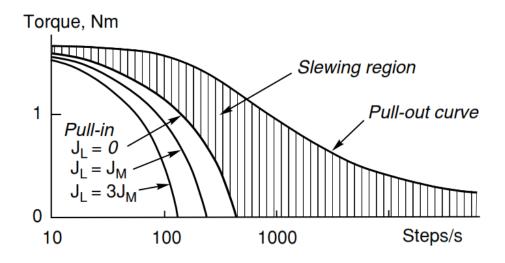
$$\omega_n^2 = \frac{penurunan\;torsi\;-\;kurva\;sudut}{total\;inersia}$$

Mengetahui ω_n , kita dapat menilai seperti apa bagian osilasi dari respon akan terlihat, dengan mengasumsikan sistem tidak *undamped*. Perkiraan untuk memperhalus, dan untuk mendapatkan waktu penyelesaian, bagaimanapun, kita perlu memperkirakan rasio *damping*, yang jauh lebih sulit untuk ditentukan karena tergantung pada jenis rangkaian kemudi dan mode operasi serta pada gesekan mekanis. Pada motor VR(Variable Reluctance), rasio damping bisa serendah 0,1, tetapi pada tipe hybrid biasanya 0,3-0,4. Nilai ini terlalu rendah untuk banyak aplikasi yang memerlukan pengaturan cepat. Dua solusi tersedia, yang paling sederhana adalah memasang damper secara mekanis dari jenis yang disebutkan di atas. Alternatifnya, urutan khusus dari pulsa perintah berjangka waktu dapat digunakan untuk mengerem rotor sehingga mencapai posisi steps yang baru dengan kecepatan nol dan tidak melampaui batas. Prosedur ini sering disebut sebagai 'damping elektronik', 'pengereman elektronik', atau 'back phasing'. Ini melibatkan memberi energi kembali pada fase sebelumnya untuk periode yang tepat sebelum rotor mencapai posisi steps berikutnya, untuk mengerahkan derajat pengereman yang tepat. Ini hanya dapat digunakan dengan sukses ketika torsi beban dan inersia dapat diprediksi dan subjek tidak berubah. Karena ini adalah skema loop terbuka, ia sangat sensitif terhadap perubahan kecil yang tampaknya kecil seperti variasi gesekan sehari-hari, yang dapat membuatnya tidak bisa dijalankan dalam banyak kasus.

Memulai dari istirahat (Starting from rest)

Dimana laju motor dapat dihidupkan dari diam tanpa kehilangan steps dikenal sebagai laju 'start' atau 'pull-in'. Laju start untuk motor yang diberikan tergantung pada jenis kemudi, dan parameter beban. Ini sepenuhnya seperti yang diharapkan karena laju start adalah ukuran kemampuan motor untuk mempercepat rotor dan bebannya serta menarik ke dalam sinkronisasi dengan medan. Dengan demikian, laju start berkurang jika torsi beban, atau inersia beban dinaikkan. Kurva pull-in torsi-kecepatan khas, untuk berbagai inersia, ditunjukkan pada Gambar 1.18. Kurva pull-out torsi-kecepatan juga ditampilkan, dan dapat dilihat bahwa untuk torsi beban tertentu, kecepatan maksimum stabil (slewing) di mana motor dapat berjalan jauh lebih tinggi daripada mendapatkan kecepatan memulai yang sesuai. (Perhatikan bahwa hanya satu torsi pull-out yang biasanya ditampilkan, dan digunakan untuk semua nilai inersia. Ini karena inersia tidak signifikan saat kecepatan konstan.)

Biasanya perlu untuk berkonsultasi dengan data pabrikan untuk mendapatkan laju pull-in, yang hanya akan berlaku untuk drive tertentu. Namun, penilaian kasar mudah dilakukan: kita hanya mengasumsikan bahwa motor menghasilkan torsi pull-out, dan menghitung percepatan yang akan dihasilkannya, dengan memberikan kelonggaran untuk torsi beban dan inersia. Jika, dengan percepatan yang dihitung, motor mampu mencapai kecepatan stabil dalam satu steps atau kurang, motor akan dapat masuk; jika tidak, rasio pull-in yang lebih rendah diindikasikan.



Gambar 1.18 Kurva pull-in dan pull-out khas yang menunjukkan efek inersia beban pada torsi pull-in. (J = inersia motor; J = inersia beban)

Akselerasi optimal dan kontrol loop tertutup

Ada beberapa aplikasi yang membutuhkan akselerasi dan deselerasi semaksimal mungkin, untuk meminimalkan waktu titik-ke-titik. Jika parameter beban stabil dan terdefinisi dengan baik, pendekatan openloop dapat dilakukan, dan ini dibahas terlebih dahulu. Namun, jika beban tidak dapat diprediksi, strategi loop tertutup sangat penting, dan ini akan ditangani nanti.

Untuk mencapai panggilan akselerasi semaksimal mungkin untuk setiap pulsa perintah step yang akan dikirim pada interval yang dioptimalkan secara tepat selama periode akselerasi. Untuk torsi maksimum, setiap fase harus hidup setiap kali dapat menghasilkan torsi positif, dan mati saat torsi negatif. Karena torsi tergantung pada posisi rotor, waktu penyakelaran yang optimal harus dihitung dari analisis dinamik penuh. Hal ini biasanya dapat dicapai dengan memanfaatkan kurva sudut-torsi statis (asalkan kelonggaran yang sesuai dibuat untuk waktu naik dan turun dari arus stator), bersama dengan karakteristik torsi-kecepatan dan inersia beban. Serangkaian komputasi diperlukan untuk memprediksi hubungan sudut-waktu rotor, dari mana titik peralihan dari satu fase ke fase lainnya disimpulkan. Rangkaian pulsa percepatan kemudian diprogram sebelumnya ke dalam pengontrol, untuk pengumpanan selanjutnya ke kemudi dalam mode loop terbuka. Jelas bahwa pendekatan ini hanya dapat diterapkan jika parameter beban tidak bervariasi, karena setiap perubahan akan membatalkan interval optimal stepper yang dihitung.

Ketika beban tidak dapat diprediksi, pengaturan yang jauh lebih baik diperoleh dengan menggunakan skema loop tertutup, menggunakan umpan balik posisi dari encoder yang dipasang di poros. Sinyal umpan balik menunjukkan posisi sesaat dari rotor, dan digunakan untuk memastikan bahwa belitan fase dialihkan pada posisi rotor yang tepat untuk memaksimalkan torsi yang dikembangkan. Gerakan dimulai oleh pulsa perintah tunggal (*single*), dan pulsa perintah step berikutnya secara efektif dihasilkan sendiri oleh encoder. Motor terus melakukan akselerasi hingga torsi bebannya sama dengan torsi beban, dan kemudian berjalan pada kecepatan (maksimum) ini hingga urutan perlambatan dimulai. Selama ini, penghitung step terus mencatat jumlah steps yang diambil.

Operasi loop tertutup memastikan bahwa akselerasi optimal tercapai, tetapi dengan mengorbankan rangkaian kontrol yang lebih kompleks, dan kebutuhan untuk menggunakan encoder poros. Namun, encoder yang relatif murah sekarang tersedia untuk pemasangan langsung ke beberapa rentang motor, dan tersedia mikrokontroler chip tunggal yang menyediakan semua fasilitas yang diperlukan untuk kontrol loop tertutup.

Pendekatan menarik yang ditujukan untuk menghilangkan encoder adalah dengan mendeteksi posisi rotor dengan analisis sinyal secara online (terutama laju perubahan arus) pada belitan motor itu sendiri: dengan kata lain, menggunakan motor sebagai encodernya sendiri. Berbagai pendekatan telah

dicoba, termasuk penambahan tegangan bolak-balik frekuensi-tinggi yang ditumpangkan pada fasa tereksitasi (excited), sehingga saat rotor bergerak, variasi induktansi menghasilkan modulasi komponen arus bolak-balik. Beberapa keberhasilan telah dicapai dengan motor tertentu, tetapi pendekatan tersebut belum mencapai eksploitasi komersial yang meluas.

Sampai akhirnya kembali ke enkoder, kita harus mencatat bahwa mereka juga digunakan dalam skema loop terbuka ketika pemeriksaan absolut pada jumlah steps yang diperlukan diambil. Dalam konteks ini encoder hanya memberikan penghitungan total steps yang diambil, dan biasanya tidak berperan dalam pembuatan step pulsa. Akan tetapi, pada beberapa tahap, jumlah steps sebenarnya yang diambil akan dibandingkan dengan jumlah pulsa perintah step yang dikeluarkan oleh pengontrol. Ketika disparitas terdeteksi, yang menunjukkan kerugian (atau kenaikan steps), pulsa maju atau mundur tambahan yang sesuai dapat ditambahkan.

TINJAUAN PERTANYAAN

- 1. Mengapa posisi step cenderung kurang terdefinisi dengan baik saat motor dioperasikan dalam mode 'on-dua-fase'(two-phase-on) dibandingkan dengan mode on-satu-fase (one-phase-on)?
- 2. Apa yang dimaksud dengan torsi detent, dan pada jenis motor apa torsi detent terjadi?
- 3. Apa yang dimaksud dengan 'torsi penahan' dari motor stapper?
- 4. Kurva torsi statis stepper VR 3-fasa kira-kira sinusoidal, torsi puncak pada arus pengenal 0,8 Nm. Temukan kesalahan posisi step saat torsi beban stabil 0,25 Nm.
- 5. Untuk motor dalam pertanyaan 4, perkirakan torsi pull-out kecepatan rendah saat motor digerakkan oleh kemudi arus konstan.
- 6. Kurva torsi statis dari motor step hibrid 1.8° tertentu dapat diperkirakan dengan garis lurus dengan kemiringan 2 Nm per derajat, dan inersia total (motor plus beban) adalah 1.8×10^{-3} kg $/m^2$. Perkirakan frekuensi osilasi rotor mengikuti single *step*.
- 7. Tentukan step sudut motor stapper berikut: (a) 3 fasa, VR, 12 gigi stator dan 8 gigi rotor; (b) 3-fasa, VR, three-stack, 16 gigi rotor; (c) unipolar 4-fasa, hibrid, 50 gigi rotor
- 8. Tes sederhana apa yang dapat dilakukan pada motor stapper tanpa tanda untuk memutuskan apakah itu motor VR atau motor hybrid?
- 9. Pada kecepatan berapakah motor stepper hibrida 1.8° berjalan jika kedua fasanya masing-masing disuplai dari catu daya 60 Hz, arus di salah satu fasa dialihkan fasa sebesar 90° ke fasa lainnya?

- 10. Arus pengenal dari motor stepper unipolar 4 fasa adalah 3 A per fasa dan tahanan lilitannya adalah 1:5 V.Ketika disuplai dari kemudi tegangan konstan sederhana tanpa tambahan tahanan paksa torsi pullout pada kecepatan 50 steps per detik adalah 0,9 Nm. Perkirakan tegangan dan tahanan paksa yang akan memungkinkan torsi pullout yang sama dicapai pada kecepatan 250 steps per detik.
- 11. Seorang ilmuwan eksperimental membaca bahwa motor kemudi biasanya menyelesaikan setiap step dalam beberapa milidetik. Dia memutuskan untuk menggunakan satu untuk alat bantu tampilan, jadi dia memasang motor VR ukuran 18 (kira-kira 4 cm) 158 per langkah sehingga porosnya vertikal, dan memasang penunjuk aluminium ringan (30 cm) sepanjang 40 cm ke poros. Ketika dia mengoperasikan motor, dia sangat kecewa menemukan bahwa setelah setiap langkah penunjuk berosilasi dengan liar dan membutuhkan waktu hampir 2 detik sebelum berhenti. Mengapa dia tidak terkejut?

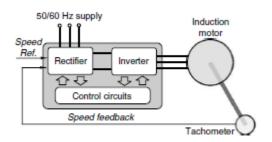
PENGGUNAAN INVERTER UNTUK PENGENDALI MOTOR INDUKSI

PENDAHULUAN

Motor induksi hanya dapat berjalan secara efisien pada beberapa slip, yang mendekati kecepatan sinkron. Metode terbaik untuk kontrol kecepatan karena harus menyediakan variasi kecepatan sinkron yang halus dan berkesinambungan, pada saatnya disebut variasi sumber frekuensi. Ini dicapai dengan menggunakan inverter sebagai sumber ke motor. Skema kontrol kecepatan yang lengkap mencakup umpan balik kecepatan ditunjukkan dalam bentuk diagram blok n Gambar 2.1.

Kami harus ingat bahwa fungsi konverter (misalnya, penyearah dan frekuensi variabel inverter) adalah untuk menarik daya dari tegangan tetap frekuensi konstan, dan mengubahnya menjadi frekuensi variabel, tegangan variabel untuk menggerakkan motor induksi. Baik penyearah dan inverter menggunakan strategi pensaklaran (*pensaklaran*), sehingga konversi daya dilakukan secara efisien.

Kendali variabel frekuensi pada motor induksi dengan inverter digunakan dalam rentang hingga ratusan kilowatt. Standar motor yang sering digunakan adalah 50 Hz atau 60 Hz, dan frekuensi keluaran inverter biasanya 5-10 Hz hingga 120 Hz. Ini cukup untuk memberikan pada sekurangnya rentang kecepatan 10:1 dengan kecepatan tertinggi dua kali dari kecepatan operasi normal. Mayoritas inverter yang ada adalah masukan 3 fasa dan keluaran (keluaran) 3 fasa, tetapi versi masukan (masukan) satu fasa hanya tersedia hingga kisaran 5kW, dan beberapa inverter yang sangat kecil (biasanya kurang dari 1 kW) yang ditujukan secara khusus penggunaan dengan motor satu fasa.



Gambar 2.1 Pengaturan umum pengendali kecepatan motor induksi variabel frekuensi menggunakan inverter (menggunakan inverter)

Aspek mendasar dari setiap konverter, yang sering diabaikan, adalah keseimbangan energi sesaat. Pada prinsipnya, untuk setiap beban tiga fasa yang seimbang, total daya beban konstan dari instan ke instan, jadi jika memungkinkan untuk membangun masukan 3-fasa yang ideal, keluaran konverter 3-fasa, sehingga tidak perlu memasukkan elemen penyimpanan energi pada konverter. Dalam praktiknya, semua konverter memerlukan penyimpanan energi (dalam kapasitor atau induktor), tetapi ini relatif kecil ketika masukannya adalah 3 fasa karena keseimbangan energinya baik. Namun, seperti yang disebutkan diatas banyak konverter daya kecil dan menengah. Dalam hal in, daya masukan sesaat adalah nol, setidaknya dua kali per siklus utama (karena tegangan dan arus melewati nol setiap setengah siklus). Jika motor yang digunakan adalah motor 3-fasa (dengan demikian menarik daya pada laju konstan), maka jelas perlu untuk menyimpan energi yang cukup dalam konverter untuk catu (catu) motor selama interval singkat ketika daya beban lebih besar dari daya masukan. Ini menjelaskan daya kecil dan menengah yang digunakan pada konverter adalah kapasitor elektrolitik.

Mayoritas inverter yang digunakan dalam pengendalian motor adalah *voltage source inverters* (VSI), dimana tegangan keluaran ke motor dikendalikan agar sesuai dengan kondisi operasi motor. *Current source inverter* (CSI) masih digunakan, terutama untuk aplikasi besar, tetapi tidak dibahas disini.

Perbandingan Menggunakan Pengendali D.C

Keberhasilan awal pengendali motor induksi dengan inverter karena fakta bahwa motor induksi standar jauh lebih murah dari pada dc yang sebanding, motor dan penghematan ini mengimbangi biaya inverter yang relative tinggi dibandingkan dengan thyristor konverter dc.



Plat 1.1 Motor induksi dengan inverter dipasang langsung ke motor (atau inverter dapat dipasang di dinding, seperti pada ilustrasi diatas, yang juga menunjukkan modul antarmuka pengguna (foto milik ABB)

Tetapi pengendali motor de selalu dilengkapi dengan kutub laminasi dan melalui ventilasi untuk memungkinkanya beroperasi terus menerus pada kecepatan rendah tanpa terlalu panas, motor induksi standar tidak memiliki ketentuan tersebut, yang telah dirancang terutama untuk operasi kecepatan penuh frekuensi tetap. Dengan demikian walaupun inverter mampu menggerakkan motor induksi dengan torsi penuh pada kecepatan rendah, operasi yang berkesinambungan tidak mungkin dilakukan karena kipas pendingin tidak akan efektif dan motor akan menjadi terlalu panas.

Sekarang pengendali menggunakan inverter mendominasi pasar, dua perubahan telah jelas, catu yang pertama sekarang memperingatkan pembatasan kecepatan rendah dari motor induksi standar, dan mendorong pengguna untuk memilih motor berpendingin blower. Dan kedua, fakta bahwa menggunakan inverter motor tidak diharuskan untuk memulai secara langsung (*direct-on-line*) pada frekuensi catu, sehingga desain tidak perlu lagi menjadi kompromi antara kinerja motor starting dan berjalan. Oleh karena itu motor dapat dirancang secara khusus untuk operasi dari inverter, dan memiliki resistansi rendah yang memberikan efisiensi kondisi tunak yang sangat tinggi dan kecepatan putar loop terbuka yang baik. Mayoritas pengendali masih menggunakan

motor standar, tetapi motor khusus inverter dengan blower integral secara bertahap mendapatkan kekuatan.

Kinerja keadaan tunak (*steady-state*) dari kendali menggunakan inverter secara umum sebanding dengan yang dilakukan oleh kendali dc (kecuali untuk batasan yang dijelaskan diatas), dengan kendali yang sama memiliki effisiensi keseluruhan yang serupa dan kemampuan kecepatan torsi secara keseluruhan. Kecepatan cenderung kurang baik dikendali motor induksi, meskipun umpan balik tacho digunakan kedua sistem akan sangat baik. Motor induksi jelas lebih kuat dan lebih cocok untuk lingkungan yang berbahaya, dan dapat berjalan pada kecepatan lebih tingggi dari pada motor dc, yang dibatasi oleh kinerja komutatornya.

Beberapa inverter awal tidak mengggunakan *pulse width modulation* (PWM), dan menghasilkan rotasi yang tersentak-sentak pada kecepatan rendah. Kebanyakan inverter daya rendah dan menengah menggunakan perangkat MOSFET atau IGBT, dan dapat modulasi pada frekuensi ultrasonik, yang secara alami menghasilkan operasi yang relatif tenang.

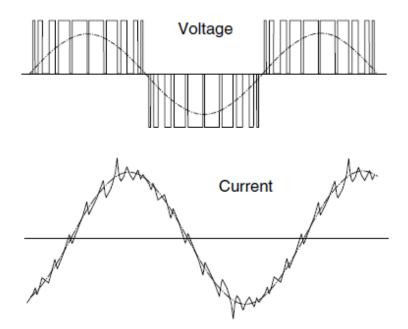
Dari sistem dasar menggunakan inverter adalah kinerja transien yang relatif buruk, untuk aplikasi kipas dan pompa dan beban inersia tinggi, ini bukan kelemahan yang serius, tetapi dimana respon cepat terhadap perubahan kecepatan atau beban diperlukan (contohnya. Dalam peralatan mesin atau pabrik rolling), kendali dc dengan kontrol arus loop yang bekerja cepat secara tradisional terbukti unggul. Namun, sekarang untuk mencapai tingkat kinerja dinamis yang setara dari motor induksi, tetapi kompleksitas kontrol secara alami mencerminkan harga yang lebih tinggi. Sebagian pabrikan sekarang menawarkan kontrol yang disebut "vektor" sebagai tambahan opsional untuk kendali berkinerja tinggi.

Bentuk Gelombang Inverter

Ketika kami melihat motor de degan inverter, kita melihat bahwa perilaku itu terutama oleh rata-rata tegangan pada motor de dan untuk sebagian besar mengabaikan komponen riak. Pendekatan serupa berguna ketika melihat bagaimana motor induksi menggunakan inverter bekerja. Kami memanfaatkan fakta bahwa meskipun bentuk gelombang tegangan aktual yang dicatu oleh inverter tidak akan sinusoidal, perilaku motorik terutama tergantung pada komponen dasar dari tegangan yang diberikan. Ini adalah penyederhanaan yang mengejutkan, karena

memungkinkan kita untuk menggunakan pengetahuan kita tentang bagaimana motor induksi berperilaku dengan catu sinusoidal untuk mengantisipasi bagaimana ia bekerja menggunakan inverter. Pada dasarnya, alasan mengapa komponen harmonik dari tegangan yang diberikan jauh lebih kecil dari pada yang mendasar adalah bahwa impedansi motor pada frekuensi harmonik jauh lebih tinggi daripada pada frekuensi dasar. Hal ini menyebabkan arus menjadi lebih sinusoidal daripada tegangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2. Medan sinusoidal diatur dengan cara yang sama..

Seperti halnya kendali de menggunakan inverter, kendali motor induksi akan menarik arus tidak sinus (non-sinusoidal) dari catu daya. Jika impedansi catu relatif tinggi, distorsi signifikan dari gelombang tegangan listrik tidak dapat dihindari kecuali dipasang filter pada sisi masukan ac, tetapi dengan catu industri normal, tidak ada masalah untuk inverter kecil dengan peringkat beberapa kW.



Gambar 1.2

Bentuk gelombang tegangan dan arus untuk PWM menggunakan inverter motor induksi.(komponen frekuensi mendasar ditunjukkan oleh garis putus-putus).

Beberapa inverter sekarang menyertakan kondisi paling depan (*front-end conditioning*) 'yaitu tahap pensaklaran frekuensi tinggi dan filter memastikan bahwa arus yang diambil dari listrik tidak hanya sinusoidal, tetapi juga pada faktor daya. Fitur ini akan tersebar luas

dalam kendali daya menengah dan tinggi untuk memenuhi kondisi semakin ketat yang diberlakukan oleh otoritas catu.

Operasi Steady-State- Pentingnya Mencapai Fluks Penuh

Tiga hubungan sederhana perlu diingat untuk menyederhanakan pemahaman tentang bagaimana motor induksi menggunakan inverter bekerja. Pertama, untuk motor induksi yang diberikan, torsi yang dikembangkan tergantung pada kekuatan gelombang kerapatan fluks yang berputar, dan kecepatan slip rotor, yaitu pada kecepatan rotor relatif sehubungan dengan gelombang fluks. Kedua amplitude gelombang fluks tergantung pada tegangan catu ke belitan stator, dan berbanding terbalik dengan frekuensi catu. Dan ketiga, kecepatan absolut gelombang fluks tergantung langsung pada frekuensi catu.

Mengingat bahwa motor hanya dapat beroperasi secara efisien ketika slip kecil, kita melihat bahwa metode dasar kontrol kecepatan terletak pada kontrol kecepatan rotasi gelombang fluks (misalnya kecepatan sinkron), dengan mengontrol frekuensi catu. Jika motor 4-kutub, misalnya, kecepatan sinkronnya adalah 1500 putaran/menit bila dicatu pada 50Hz, 1200 putaran/permenit pada 40Hz, 750 putaran/menit pada 25 Hz dan seterusnya. Karenanya, kecepatan tanpa beban hampir sebanding dengan frekuensi catu, karena torsi tanpa beban kecil dan slip yang sesuai juga sangat kecil.

Sekarang beralih pada beban, kita tahu bahwa ketika beban diterapkan maka rotor akan melambat, slip meningkat, lebih banyak arus induksi dalam rotor, dan lebih banyak torsi dihasilkan. Ketika kecepatan telah berkurang ketika dimana motor torsi sama dengan torsi beban, kecepatan menjadi baik. Kami biasanya ingin penurunan kecepatan dengan beban menjadi sekecil mungkin, tidak hanya untuk meminimalkan penurunan kecepatan dengan beban, tetapi untuk memaksimalkan efisiensi: singkatnya, kami ingin meminimalkan slip untuk beban yang diberikan.

Slip torsi yang diberikan tergantung pada amplitude gelombang fluks yang berputar: semakin tinggi fluks, semakin kecil slip yang diperlukan. Oleh karena itu, setelah mengatur kecepatan rotasi gelombang fluks yang diinginkan dengan mengendalikan frekuensi keluaran inverter, kita juga harus memastikan bahwa besarnya fluks disesuaikan sehingga berada pada nilai

penuh (terukur),terlepas dari kecepatan rotasi. Ini dicapai dengan membuat tegangan keluaran dari inverter bervariasi.

Kita ingat bahwa amplitude gelombang fluks sebanding dengan tegangan catu dan berbanding terbalik dengan frekuensi, jadi jika kita mengatur bahwa catu tegangan oleh inverter bervariasi berbanding lurus dengan frekuensi, gelombang fluks akan memiliki amplitude yang konstan. Filosofi ini adalah jantung dari kebanyakan sistem kendali menggunakan inverter: ada beberapa variasi, seperti yang akan kita lihat, tetapi dalam sebagian besar kasus pada kontrol internal inverter akan dirancang sedemikian rupa sehingga rasio tegangan terhadap frekuensi (V/f) secara otomatis dijaga konstan, setidaknya hingga basis frekuensi 50Hz atau 60Hz.

Banyak perancangan inverter untuk mengkoneksikan langsung ke catu utama, tanpa transformator, dan sebagai hasilnya tegangan maksimum keluaran inverter terbatas pada nilai yang sama dengan catu utama. Misalnya dengan catu 415 V, maka maksimum keluaran inverter kemungkinan 450 V. Karena biasanya inverter akan digunakan untuk mencatu motor induksi, standar yang dirancang untuk operasi 415 V 50 Hz, jelas bahwa inverter ketika diatur untuk memberikan 50 Hz, tegangan harus 415 V, yang berada pada kisaran tegangan inverter. Tetapi ketika frekuensi dinaikkan 100 Hz, tegangan ideal seharusnya ditingkatkan mencapai 830 V untuk mendapatkan fluks yang penuh. Inverter tidak dapat mencatu tegangan diatas 450 V, dan karena itu dalam hal ini fluks penuh hanya dapat dipertahankan hingga kecepatan sedikit diatas kecepatan dasar. Perlu dicatat bahwa inverter dapat memberikan tegangan lebih tinggi, tapi tidak dapat diterapkan pada motor standar.

Inverter yang sudah mapan mampu mempertahankan rasio V/f yang konstan hingga kecepatan dasar 50Hz atau 60Hz, tetapi untuk menerima bahwa pada semua frekuensi tegangan yang lebih tinggi akan konstan pada nilai maksimumnya. Ini berarti bahwa fluks dipertahankan konstan pada kecepatan hingga kecepatan dasar, tetapi diluar itu fluks berkurng terbalik dengan frekuensi.

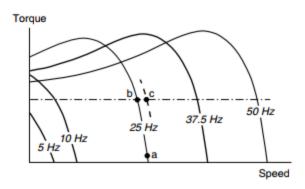
Pengguna terkadang khawatir mengetahui bahwa tegangan dan frekuensi berubah ketika diperlukan kecepatan baru. Perhatikan ketika tegangan terlihat berkurang ketika kecepatan yang lebih rendah. Tentunya, hal ini diperdebatkan, tidak dapat beroperasi katakanlah motor induksi 400 V pada sesuatu yang kurang dari 400 V. Kekeliruan dalam pandangan ini sekarang harus jelas: angka tegangan listrik 400 V, 50Hz hanyalah tegangan yang sesuai untuk motor ketika dijalankan

secara langsung. Jika tegangan terpenuhi ini diterapkan ketika frekuensi dikurangi menjadi 25 Hz, implikasinya adalah bahwa fluks harus naik dua kali lipat. Ini akan sangat membebani rangkaian magnetik mesin, sehingga menimbulkan saturasi berlebihan pada besi, arus magnetisasi yang sangat besar dan kerugian besi dan tembaga yang tidak dapat diterima. Untuk mencegah hal ini terjadi, dan menjaga fluks pada nilai pengenalnya, penting untuk mengurangi tegangan sebanding dengan frekuensi. Dalam kasus diatas, misalnya, tegangan yang benar 200 V pada frekuensi 25 Hz.

KARAKTERISTIK TORSI KECEPATAN OPERASI V/F KONSTAN

Ketika tegangan pada setiap frekuensi disesuaikan, sehingga rasio V/F dijaga konstan hingga kecepatan dasar dan tegangan penuh diterapkan setelahnya, Sebuah kurva torsi kecepatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Kurva ini adalah jenis untuk motor induksi standar dari beberapa keluaran kW. Seperti yang diharapkan, kecepatan tanpa beban berbanding lurus dengan frekuensi, dan jika frekuensi dijaga konstan, misalnya pada 25 Hz pada Gambar 2.3, kecepatan turun hanya sedikit tanpa beban (titik a) ke beban penuh (titik b). karenanya ini adalah karakteristik loop terbuka yang baik, karena kecepatan dipegang dengan cukup baik tanpa beban hingga beban penuh. Jika aplikasi meminta kecepatan ditahan dengan tepat, ini jelas dapat dicapai (dengan bantuan kontrol kecepatan loop tertutup) dengan menaikkan frekuensi sehingga titik operasi beban penuh bergerak ketitik (c).

Kami juga mencatat bahwa torsi tarikan dan kekakuan torsi (yaitu kemiringan kurva kecepatan torsi di wilayah operasi normal) kurang lebih sama disemua titik dibawah kecepatan dasar, kecuali pada frekuensi rendah dimana efek dari resistansi stator dalam mengurangi fluks menjadi sangat jelas dari Gambar 1.3 bahwa torsi awal pada frekuensi minimum jauh lebih sedikit daripada torsi tarikan pada frekuensi yang lebih tingi dan ini bias menjadi masalah untuk beban yang membutuhkan torsi awal yang tinggi.



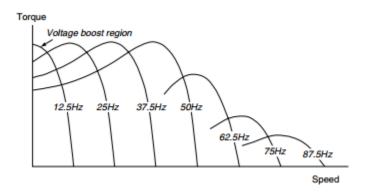
Gambar 2.3 Kurva torsi kecepatan untuk motor induksi menggunakan inverter dengan rasio frekuensi tegangan konstan

Kinerja frekuensi rendah dapat ditingkatkan dengan meningkatkan rasio V/F pada frekuensi rendah untuk mengembalikan fluks penuh, suatu teknik yang disebut sebagai meningkatkan tegangan kecepatan rendah. Kebanyakan pengendali menggabungkan ketentuan untuk beberapa bentuk peningkatan tegangan, baik dengan penyesuaian tunggal untuk memungkinkan pengguna mengatur torsi awal yang diinginkan, atau dengan cara penyediaan yang lebih kompleks untuk memvariasikan rasio V/F pada rentang frekuensi. Serangkaian kurva pengendali torsi kecepatan dengan karakteristik torsi kecepatan rendah yang ditingkatkan diperoleh dengan peningkatan tegangan ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Kurva pada Gambar 2.4 memiliki daya tarik yang jelas karena menunjukkan bahwa motor mampu menghasilkan torsi maksimum yang hampir sama pada semua kecepatan dari nol hingga kecepatan dasar (50Hz atau 60Hz). Wilayah karakteristik ini dikenal sebagai wilayah torsi konstan, yang berarti bahwa untuk frekuensi hingga kecepatan dasar, torsi motor maksimum yang dapat diberikan tidak bergantung pada kecepatan yang ditetapkan. Pengoperasian terus-menerus pada torsi puncak tidak akan diizinkan karena motor akan terlalu panas, sehingga batas atas akan dikenakan oleh pengontrolnya. Dengan batas yang diberlakukan ini, operasi dibawah kecepatan dasar sesuai dengan wilayah kendali tegangan dinamo dari sebuah kendali dc.

Kita harus mencatat bahwa ketersediaan torsi tinggi pada kecepatan rendah (terutama pada kecepatan nol) berarti bahwa kita dapat menghindari semua masalah 'starting' yang terkait dengan operasi frekuensi tetap. Memulai dengan frekuensi rendah yang kemudian secara bertahap dinaikkan, kecepatan slip rotor selalu kecil, yaitu rotor beroperasi dalam kondisi optimal untuk produksi torsi sepanjang waktu, sehingga menghindari semua kerugian dari slip tinggi (torsi

rendah dan arus tinggi) yang berhubungan dengan frekuensi. Ini berarti bahwa tidak hanya motor menggunakan inverter dapat memberikan torsi pengenal pada kecepatan rendah, tetapi mungkin lebih penting. Kita dapat dengan aman beroperasi dari catu yang lemah tanpa menyebabkan penurunan tegangan yang berlebihan, untuk beberapa aplikasi dasar kecepatan tetap.



Gambar 2.4 Kurva torsi kecepatan untuk jenis motor induksi menggunakan inverter dengan peningkatan tegangan kecepatan rendah, rasio frekuensi tegangan konstan dari kecepatan rendah hingga kecepatan dasar, dan tegangan konstan diatas kecepatan dasar

Diluar frekuensi dasar, rasio V/F berkurang karena V tetap konstan. Amplitude dari gelombang fluks karena itu mengurangi berbanding terbalik dengan frekuensi. Tarikan torsi selalu terjadi pada nilai absolut yang sama dari kecepatan slip, bahwa torsi puncak sebanding dengan kuadrat dari kepadatan fluks. Oleh karena itu didaerah tegangan konstan torsi puncak berkurang terbalik dengan kuadrat frekuensi dan kurva kecepatan torsi menjadi kurang curam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

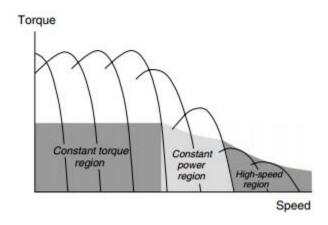
Meskipun kurva pada Gambar 2.4 menunjukkan torsi yang dapat dihasilkan motor untuk setiap frekuensi dan kecepatan, mereka tidak memberikan indikasi apakah operasi kontinu dimungkinkan pada setiap titik, namun hal ini tentu saja sangat penting dari sudut pandang pengguna.

Keterbatasan Yang Diberlakukan Oleh Inverter Daya Dan Torsi Konstan

Perhatian utama dalam inverter adalah membatasi arus ke nilai yang aman sejauh perangkat pensaklaran utama. Batas arus akan setidaknya sama dengan arus pengenal motor, dan rangkaian

kontrol inverter akan diatur sehingga apa pun yang dilakukan pengguna, arus keluaran tidak dapat melebihi nilai aman.

Fitur saat ini memaksakan batas atas pada torsi yang diizinkan diwilayah dibawah kecepatan dasar. Ini biasanya sekitar setengah torsi, seperti yang ditunjukkan oleh daerah berarsir pada Gambar 2.5. Wilayah dibawah kecepatan dasar, motor dapat mengembangkan torsi hingga nilai terukur pada kecepatan apapun (tetapi tidak harus untuk periode yang berkepanjangan, seperti dibahas dibawah). Oleh karena itu dikenal sebagai wilayah 'torsi konstan', dan itu sesuai dengan wilayah kendali tegangan armature pada dc.



Gambar 2.5 Daerah motor kecepatan tinggi, torsi konstan dan daya konstan

Kecepatan dasar fluks berkurang secara terbalik dengan frekuensi karena arus stator (dan karenanya rotor) terbatas, torsi maksimum yang diijinkan juga berkurang berbanding terbalik dengan kecepatan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Karena itu wilayah ini dikenal sebagai wilayah 'kekuatan konstan'. Tentu saja ada parallel yang dekat dengan dc. Kedua sistem beroperasi dengan medan yang berkurang diwilayah daya konstan. Wilayah daya yang konstan biasanya meluas ke suatu tempat dua kali kecepatan dasar, dan karena fluks berkurang motor harus beroperasi dengan slip lebih tinggi dari pada dibawah kecepatan dasar untuk mengembangka arus penuh dan torsi rotor.

Pada batas atas dari daerah daya konstan, batas arus bertetapan dengan batas torsi. Pengoperasian pada kecepatan yang masih lebih tinggi kadang-kadang disediakan, tetapi daya konstan tidak lagi tersedia karena torsi maksimum terbatas pada nilai penarikn (*pull-out*), yang

mengurangi berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi. Diwilayah motor kecepatan tinggi ini (Gambar 1.5), hubungan kecepatan torsi membatasi dengan seri dc motor.

Keterbatasan Yang Dikenakan Oleh Motor

Standar praktik di kendali de menggunakan motor yang dirancang khusus untuk operasi dari konverter thyristor. Motor akan memiliki kerangka berlapis, akan dilengkapi dengan tachogenerator, dan yang paling penting dari semuanya akan dirancang untuk melalui ventiasi dan dilengkapi dengan peniup udara. Ventilasi yang memadai dijamin pada semua kecepatan dan operasi terus menerus dengan torsi penuh (misalnya, arus penuh) bahkan pada kecepatan terendah.

Sebaliknya, masih umum bagi industri standar sistem menggunakan inverter untuk menggunakan motor induksi. Motor-motor ini benar-benar tertutup, dengan kipas internal yang terpasang di poros, yang menghembuskan udara keluar kasing. Mereka dirancang pertama terutama untuk operasi terus menerus dari kabel frekuensi tetap, dan berjalan pada kecepatan dasar. Ketika motor seperti itu dioperasikan pada frekuensi rendah (misalnya 10 Hz), kecepatannya jauh lebih rendah dari kecepatan dasar dan efisiensi pendingin sangat berkurang. Pada kecepatan yang lebih rendah, motor akan dapat menghasilkan torsi sebanyak pada kecepatan dasar (lihat Gambar 1.4) tetapi dengan melakukan hal tersebut kerugian pada stator dan rotor juga akan berkurang lebih sama dengan kecepatan dasar. Karena kipas cukup untuk mencegah panas berlebih pada kecepatan dasar, maka tidak dapat dihindari bahwa motor akan terlalu panas jika dioperasikan pada torsi penuh dan kecepatan rendah untuk waktu yang lama. Beberapa catu pengendali inverter tidak menekankan batasan ini, sehingga pengguna perlu mengajukan pertanyaan apakah motor tidak standar akan dibutuhkan.

Ketika motor berventilasi melalui blower integral menjadi standar yang diterima, sistem menggunakan inverter akan dibebaskan dari batasan kecepatan rendah. Sementara pengguna harus memperhatikan bahwa satu pendekatan yang dirancang untuk melindungi bahaya terlalu panas pada kecepatan rendah adalah agar rangkaian kontrol dirancang, sehingga batasan fluks dan arus dikurangi pada kecepatan rendah.

PENGATURAN PENGENDALIAN UNTUK KEMUDI (DRIVE) MENGGUNAKAN INVERTER

Untuk produsen kontrol kecepatan menawarkan pilihan mulai dari kecanggihan dari skema dasar loop terbuka. Melalui skema loop tertutup dengan umpan balik tacho atau encoder, hingga vektor skema kontrol yang diperlukan ketika kinerja dinamis optimal. Variasi skema jauh lebih besar daripada untuk kendali yang sepenuhnya. Mayoritas kendali sekarang menyediakan antarmuka digital sehingga pengguna dapat memasukkan data seperti kecepatan maksimum dan minimum, torsi maksimum, dan lain-lain. Tujuan umum inverter dengan motor tertentu memiliki ketentuan untuk parameter motor seperti frekuensi dasar, slip dan arus muatan penuh, reaktansi kebocoran dan resistansi rotor yang akan dimasukkan sehingga kemudi dapat mengoptimalkan kontrolnya sendiri. Mungkin yang paling utama adalah mendorong komissioning mandiri (*drive selft-commissioning*) yang menerapkan sinyal uji ke motor ketika pertama kali terhubung, tentukan parameter motor, dan kemudian atur sendiri untuk memberikan kinerja optimal.

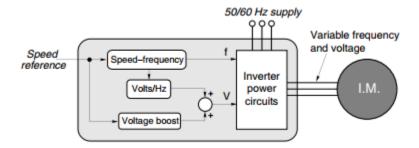
Kontrol Kecepatan Loop Terbuka

Dalam ukuran yang lebih kecil, kendali 'V/F' sederhana adalah yang paling popular dan ditunjukkan pada Gambar 2.6. Frekuensi keluaran dan karenanya kecepatan tanpa beban motor, diatur oleh sinyal referensi kecepatan, yang dalam skema analog dapat berupa tegangan analog (0-10V) atau (4-20 mA). Sinyal kecepatan ini dapat diperoleh dari potensiometer atau dari jarak jauh. Dari sekema digital yang semakin umum, referensi kecepatan akan ditetapkan pada keypad. Akan disediakan beberapa penyesuaian rasio V/F dan peningkatan tegangan kecepatan rendah.

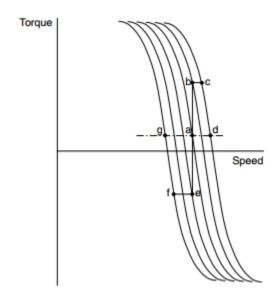
Kurva torsi kecepatan operasi tunak yang khusu ditunjukkan pada Gambar 2.7. Untuk setiap kecepatan yang disetting (yaitu setiap frekuensi), kecepatannya tetap konstan karena karakteristik slip torsi sangkar motor. Jika beban ditingkatkan melebihi torsi terukur, batas arus internal (tidak diperlihatkan dalam Gambar 2.6) ikut berperan untuk mencegah motor mencapai wilayah tidak stabil. Sebagai gantinya frekuensi dan kecepatan dikurangi sehingga sistem berperilaku sama seperti kemudi dc.

Perubahan mendadak dalam referensi kecepatan dilindungi oleh aksi dari sinyal ramp frekuensi internal, yang menyebabkan frekuensi meningkat atau menurun secara bertahap. Jika inersia beban rendah, akselerasi akan tercapai tanpa motor memasuki rezim batas saat ini. Disisi

lain jika inersia besar, akselerasi akan mengambil letakkan disepanjang lintasan torsi kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 skematik diagram open-loop menggunakan inverter terkontrol kecepatan motor induksi



Gambar 2.7 Lintasan akselerasi dan deelerasi pada bidang torsi kecepatan

Misalkan motor beroperasi dalam keadaan tunak dengan torsi beban konstan pada titik (a), ketika kecepatan baru yang lebih tinggi (sesuai dengan titik (d)). Frekuensi meningkat, menyebabkan torsi motor naik ketitik (b), dimana arus telah mencapai batas yang diijinkan. Laju peningkatan frekuensi kemudian secara otomatis dikurangi sehingga motor berakselerasi dalam kondisi arus konstan ke titik (c), dimana arus turun dibawah batas: frekuensi kemudian tetap konstan dan lintasan mengikuti kurva dari (c) untuk menyelesaikan pada titik (d).

Lintasan perlambatan tertentu ditunjukan pada Gambar 2.7. Torsi negatif untuk sebagian besar waktu, motor beroperasi dikuadran 2 dan meregenerasi energi kinetik ke inverter. Kebanyakan inverter kecil tidak memiliki kemampuan untuk mengembalikan daya ke catu ac, dan oleh karena itu kelebihan energi harus disipasi dalam sebuah resistor didalam konverter. Resistor biasanya terhubung melewati dc, dan dikendalikan oleh chopper. Ketika referensi tegangan cenderung naik, karena energi yang diregenerasi, chopper mengaktifkan resistor untuk menyerap energi. Oleh karena itu beban inersia tinggi, yang sering mengalami perlambatan dapat menimbulkan masalah disipasi daya yang berlebihan pada resistor 'dump'.

Pembalikan kecepatan tidak menimbulkan masalah, urutan pengaktifan inverter dibalik secara otomatis pada kecepata nol, sehingga memungkinkan motor untuk melanjutkan dengan lancar ke kuadran 3 dan 4.

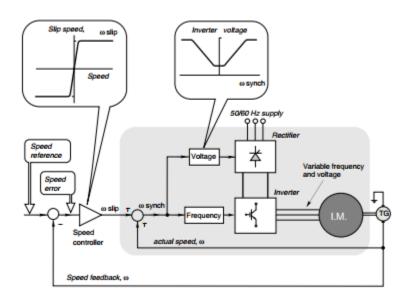
Beberapa skema termasuk kompensasi slip, dimana kemudi komponen aktif dari arus beban, yang merupakan ukuran torsi; dan kemudian meningkatkan frekuensi motor untuk mengimbangi kecepatan slip rotor dan demikian mempertahankan kecepatan yang sama seperti tanpa beban. Ini mirip dengan kompensasi 'IR' yang digunakan pada loop terbuka kemudi dc.

Kontrol Kecepatan Loop Tertutup

Dimana diperlukan penahanan kecepatan yang tetap, skema loop tertutup harus digunakan dengan umpan balik kecepatan dari salah satu dc atau ac, tachogenerator atau encoder poros digital. Banyak strategi kontrol yang berbeda yang digunakan, jadi kami akan mempertimbangkan pengaturan khusus yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Inverter ini memiliki kontrol terpisah dari ac tegangan keluaran (melalui masukan kontrol fasa dalam penyearah) dan frekuensi (melalui pensaklaran di inverter), dan ini membuat pemahaman bagaimana sistem kontrol beroperasi lebih mudah daripada ketika tegangan dan frekuensi dikontrol secara bersamaan, seperti pada inverter PWM.

Gambar 2.8 telah ditarik untuk menekankan kesamaan dengan loop tertutup kemudi dc. Pengalaman menunjukkan bahwa pemahaman tentang bagaimana kemudi dc beroperasi sangat membatu dalam studi kemudi motor induksi, sehingga pembaca mungkin ingin menyegarkan

kembali gagasan mereka tentang 2-loop dc. Asumsikan bahwa variabel kontrol adalah sinyal analog kontinu, meskipun sebagaian besar implementasi akan melibatkan perangkat keras digital.



Gambar 2.8 Diagram skematik kemudi motor yang dikendalikan oleh loop tertutup menggunakan inverter dengan umpan balik tacho

Susunan kontrol loop kecepatan (lihat Gambar 2.8) identik dengan yang ada pada kemudi dc. Kecepatan aktual (diwakili oleh tegangan yang dihasilkan oleh tachogenerator) dibandingkan dengan target atau kecepatan referensi dan kesalahan kecepatan yang dihasilkan membentuk masukan ke pengontrol kecepatan. Keluaran dari pengontrol kecepatan menyediakan masukan atau referensi kebagian dalam sistem kontrol, ditunjukkan dalam Gambar 2.8. Dalam kedua dc kemudi dan kemudi motor induksi, keluaran dari pengontrol kecepatan berfungsi sebagai sinyal referensi torsi, dan bertindak sebagai masukan ke bagian dalam dari sistem. Kita sekarang akan melihat seperti pada kemudi dc, sistem bagian dalam kemudi yang menggunakan inverter secara efektif merupakan loop torsi kontrol yang memastikan bahwa torsi motor berbanding lurus dengan sinyal referensi torsi pada semua kondisi.

Kita telah melihat bahwa, jika besarnya gelombang fluks dalam motor induksi dijaga konstan, torsi diwilyah operasi normal berbanding lurus dengan kecepatan slip. (kita harus ingat bahwa 'wilayah operasi normal' berarti nilai slip yang rendah, biasanya beberapa persen dari kecepatan sinkron). Jadi parameter yang harus dikontrol untuk mengendalikan torsi adalah kecepatan slip. Tetapi satu satunya variabel yang dapat kita ubah secara langsung adalah frekuensi

stator dan satu-satunya varibel yang dapat kita ukur secara eksternal adalah kecepatan rotor yang sebenarnya. Ketiga kuantitas ini (lihat Gambar 1.8) diwakili oleh tegangan analog berikut:

$$Kecepatan \ slip = \omega_{slip}$$

 $Kecepatan \ sinkron = \omega_{synch}$

Kecepatan rotor = ω ,

Dimana
$$\omega_{\text{synch}} = \omega + \omega_{\text{slip}}$$
 (2.1)

Persamann (2.1) menunjukkan bagaimana kita harus memvariasikan frekuensi stator (yaitu kecepata sinkron) jika kita ingin memperoleh kecepatan slip yang diberikan. Kita hanya perlu mengukur kecepatan rotor dan menambahkannya ke slip yang sesuai kecepatan untuk mendapatkan frekuensi yang akan di catu ke stator. Operasi ini dilakukan pada persimpangan penjumlahan pada masukan kebagian dalam yang diarsir pada Gamabar 2.8: keluaran dari persimpanagan penjumlahan secara langsung mengontrol frekuensi keluaran inverter (yaitu kecepatan sinkron), dan melalui pembentukan, amplitude dari tegangan keluaran inverter.

Fungsi pembentukan, yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 memberikan frekuensi tegangan yang konstan disebagian besar hingga kecepatan dasar, dengan peningkatan (*boost*) tegangan pada frekuensi rendah. Kondisi ini diperlukan untuk menjamin kondisi 'fluks konstan' yang merupakan persyaratan penting bagi kami untuk mengklaim bahwa torsi sebanding dengan kecepatan slip. (kita juga harus menerima bahwa segera setelah kecepatan naik diatas kecepatan dasar, dan rasio frekuensi tegangan tidak lagi dipertahankan, refernsi kecepatan slip yang diberikan ke sistem bagian dalam akan menghasilkan lebih sedikit torsi daripada dibawah kecepatan dasar, karena fluks akan menjadi menurun.

Kami telah mencatat kesamaan anatara struktur motor induksi dan kemudi dc, torsi berbanding lurus dengan arus dan oleh karena itu dikendalikan langsung oleh loop dalam. Sebaliknya, loop dalam pada skema induksi memberikan kontrol torsi secara tidak langsung, melalui pengaturan kecepatan slip dan ini melibatkan loop umpan balik posistif. Ini bergantung pada keberhasilannya pada hubungan linier antara torsi slip, dan dengan demikian hanya berlaku ketika fluks dipertahankan pada nilai penuh dan kecepatan slip rendah; dan karena melibatkan

umpan balik positif, ada potensi ketidak stabilan jika penguatan (gain) loop lebih besar dari satu, yang berarti bahwa konstanta tachogenerator harus dinilai dengan hati-hati.

Sekarang kembali ke kecepatan loop mengasumsikan untuk saat itu bahwa pengontrolan kecepatan sederhana sangat mudah untuk penguatan tinggi, memahami operasi dari loop kontrol kecepatan. Ketika kesalahan kecepatan meningkat (karena beban telah sedikit meningkat dan menyebabkan kecepatan mulai turun, atau target kecepatan telah dinaikkan secara sederhana) keluaran dari pengontrol kecepatan meningkat secara proporsional, menandakan ke loop dalam bahwa lebih banyak torsi diperlukan untuk melawan peningkatan beban ketika target kecepatan didekati, kesalahan kecepatan berkurang, torsi berkurang dan target kecepatan tercapai dengan sangat lancar. Jika penguatan dari penguat kesalahan kecepatan tinggi, kesalahan kecepatan dalam kondisi tunak selalu rendah, misalnya kecepatan aktual akan sangat dekat dengan kecepatan referensi.

Dalam diskusi diatas, diasumsikan bahwa pengontrol kecepatan tetap berbeda diwilayah liniernya, misalnya, kesalahan kecepatan selalu kecil. Tetapi kita tahu bahwa dalam praktiknya ada banyak situasi dimana akan terjadi kesalahan kecepatan sangat besar. Misalnya ketika motor dalam keadaan diam dan referensi kecepatan tiba-tiba dinaikkan menjadi 100%, kesalahan kecepatan akan segera menjadi 100%. Sinyal masukan sebesar itu akan menyebabkan keluaran penguat kesalahan kecepatan pada nilai maksimum, sketsa karakteristik penguat ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dalam hal ini referensi slip akan berada pada nilai maksimum, torsi dan akselerasi juga akan maksimal, yang kami inginkan untuk mencapai target kecepatan dalam waktu minimum. Ketika kecepatan meningkat, tegangan dan frekuensi terminal motor akan naik untuk mempertahankan slip maksimum hingga kesalahan kecepatan turun ke nilai yang rendah dan penguat kesalahan kecepatan keluar dari saturasi.

Dalam transien jangka panjang yang relatif dari tipe yang baru saja dibahas, dimana perubahan frekuensi motor terjadi relatif lambat (misalnya frekuensi meningkat beberapa persen per siklus) perilaku kemudi menggunakan inverter standar sangat mirip dengan yang ada pada dua loop kemudi dc. Kontrol analog menggunakan penguat kesalahan kecepatan proporsional dan integral, dapat memberikan respon transien yang baik dan kecepatan keadaan tunak lebih baik dari 1% untuk rentang kecepatan 20:1 atau lebih. Untuk presisi yang lebih tinggi, digunakan poros encoder bersama dengan loop fasa terkunci (*phase-locked*). Kebutuhan untuk memasang tacho

atau encoder dapat menjadi masalah jika digunakan motor induksi standar, biasanya tidak ada ektensi poros diujung tanpa kemudi. Pengguna kemudian menghadapi prospek membayar lebih banyak untuk jumlah modifikasi yang relatif kecil, hanya karena motor kemudian berhenti menjadi standar.

KENDALI VEKTOR ORIENTASI BIDANG

Dimana diperlukan perubahan yang sangat cepat dalam kecepatan, namun kemudi dengan inverter standar dibandingkan dengan kemudi dc. Keunggulan kemudi dc bermula dari respon transien yang relatif baik dari dc motor dan selanjutnya dari fakta bahwa torsi dapat dikontrol secara langsung bahkan dalam kondisi transien dengan mengendalikan arus jangkar (armature), sebaliknya motor induksi pada dasarnya memiliki kinerja transien yang buruk.

Sebagai contoh, ketika motor induksi berjalan tanpa beban langsung kita tahu bahwa itu berjalan dengan kecepatan, tetapi jika kita melihat secara terperinci. Kita akan melihat bahwa torsi sesaat berfluktuasi untuk beberapa siklus pertama.

Untuk sebagian besar aplikasi, motor induksi menggunakan inverter standar cukup memadai, tetapi untuk beberapa tugas yang sangat berat, seperti kemudi poros alat mesin berkecepatan tinggi, kinerja dinamis sangat penting dan kontrol vektor atau orientasi bidang. Memahami semua seluk beluk kontrol vektor jauh diluar jangkauan kita, tetapi ada baiknya menguraikan cara kerjanya, ada beberapa buku teks terbaru pada mesin elektrik yang sekarang mencakup teori pengendalian vektor (yang masih sulit dipahami untuk para ahli) tetapi mayoritas berkonsentrasi pada teori kontrol dan sangat sedikit menjelaskan apa yang sebenarnya terjadi di dalam motor ketika dioperasikan dibawah kendali vektor.

Kontrol Torsi Transien

Kita telah melihat sebelumnya bahwa pada motor induksi dan motor dc, torsi dihasilkan oleh interaksi arus pada rotor dengan kerapatan fluks radial yang dihasilkan oleh stator. Jadi untuk megubah torsi, kita harus mengubah besarnya fluks atau arus rotor, atau keduanya; dan jika kita ingin meningkatkan torsi secara tiba-tiba, kita harus melakukan perubahan secara instan.

Karena setiap medan magnet menyimpan energi yang terkait denganya, harus jelas bahwa tidak mungkin mengubah medan magnet secara instan, karena akan memerlukan energi untuk

berubah dalam waktu nol, yang membutuhkan daya tak terbatas. Dalam kasus utama pada motor, kita tidak bisa berharap untuk membuat perubahan cukup cepat pada perubahan torsi, jadi satu satunya alternatif adalah membuat perubahan arus rotor secepat mungkin.

Motor dc relatif mudah untuk membuat perubahan yang sangat cepat dalam arus jangkar, karena memiliki akses langsung ke arus jangkar melalui sikat. Induktansi rangkaian jangkar relatif kecil, sehingga selama kami memiliki banyak tegangan yang tersedia, kami dapat menerapkan tegangan besar (untuk waktu yang sangat singkat, maka kami ingin melakukan perubahan mendadak pada arus jangkar dan torsi. Ini dilakukan secara otomatis oleh loop dalam kemudi dc.

Pada motor induksi, hal-hal tentang permasalahan disebabkan oleh tidak memliki akses langsung ke arus rotor, yang harus diinduksi dari stator. Namun demikian, karena belitan stator dan rotor dipasangkan secara rapat pada bidang celah udara adalah untuk membuat lebih banyak atau lebih sedikit perubahan pada arus yang diinduksi dalam rotor, dengan membuat perubahan seketika pada arus stator. Setiap perubahan mendadak dalam pola MMF stator (yang dihasilkan dari perubahan arus stator) segera diatasi oleh MMF yang diatur oleh arus rotor. Pengorganisasian perubahan mendadak ini dalam arus rotor mewakili esensi dan tantangan dari metode pengendalian vektor.

Kami telah mengatakan bahwa kami harus membuat perubahan tiba-tiba pada arus stator, dan ini dicapai dengan memberikan setiap fasa dengan pengontrol arus loop tertutup yang bekerja cepat. Untungnya, dalam kondisi transien induktansi efektif yang melihat stator cukup kecil (sama dengan induktansi kebocoran), sehingga dimungkinkan untuk memperoleh perubahan yang sangat cepat pada arus stator dengan menerapkan tegangan impuls berdurasi tinggi ke gulungan stator. Dalam hal ini setiap pengontrol arus stator sangat mirip dengan pengontrol arus jangkar yang digunakan pada kemudi dc.

Ketika diperlukan langkah perubahan torsi, besanya frekuensi dan fasa dari tiga arus stator diubah secara instan sedemikian rupa sehingga frekuensi, besarnya lonjakan frekuensi dan fasa gelombang arus rotor tiba-tiba dari kondisi stabil ke yang lain. Perubahan ini dilakukan tanpa mengubah amplitude atau posisi hubungan fluks rotor yang dihasilkan relatif terhadap rotor, yaitu tanpa mengubah energi yang tersimpan secara signifikan. Karena itu istilah kerapatan fluks (B), sedangkan istilah I_r dan φ_r berubah secara instan ke nilai kondisi tunak, sesuai dengan slip dan torsi kondisi tunak baru baru.

Kita dapat menggambarkan apa yang terjadi jika kita dapat mengamati gelombang MMF stator secara instan bahwa diperlukan langkah peningkatan torsi. Demi kesederhanaan, kita akan mengasumsikan bahwa kecepatan rotor tetap konstan, dalam hal ini kita akan menemuan bahwa:

- a. Gelombang stator MMF tiba-tiba meningkatkan amplitudonya;
- b. Tiba-tiba mempercepat ke kecepatan sinkron baru;
- c. Lompatan baru untuk mempertahanlan fasa relatinya yang benar sehubungan dengan fluks rotor dan gelombang arus.

Setelah itu MMF stator mempertahankan amplitude baru, dan berputar pada kecepatan barunya. Rotor mengalami penningktan mendadak pada arus dan torsi arus baru dipertahankan oleh stator baru, (lebih tinggi) arus dan frekuensi slip.

Kita harus mencatat bahwa sebelum dan sesudah perubahan tiba-tiba, motor beroperasi dengan cara normal, seperti yang dibahas sebelumnya. 'pengendalian vektor' dapat melakukan transisi bertahap dari satu kondisi operasi tunak ke kondisi lainnya, dan itu tidak berpengaruh apapun begitu mencapai tunak.

Fitur unik dari penggerak vektor yang membedakanya dari penggerak scalar biasa (dimana hanya besarnya dan frekuensi gelombang MMF yang berupa stator, diperlukan lebih banyak torsi) adalah dengan membuat perubahan mendadak yang tepat ke posisi sesaat dari posisi tersebut. Gelombang stator MMF, transisi dari satu kondisi stabil ke yang lain dicapai secara instan. Secara khusus, pendekatan vektor memungkinkan kita untuk mengatasi waktu konstan listrik dari pelindung rotor, yang bertanggung jawab atas respon transien yang secara melekat lamban. Juga harus ditunjukkan bahwa dalam praktiknya, kecepatan rotor tidak akan tetap konstan ketika torsi berubah (seperti yang diasumsikan dalam pembahasan di atas) sehingga untuk melacak posisi yang tepat dari gelombang fluks motor, perlu memiliki sinyal umpan balik posisi rotor.

Karena motor induksi adalah sistem multi-variabel non-linier diperlukan model matematika yang rumit dari motor tersebut dan penerapan algoritma kontrol yang kompleks memerlukan sejumlah perhitungan besar cepat untuk terus dilakukan sehinga tegangan instan yang tepat dapat terjadi diterapkan pada setiap belitan stator. Baru-baru ini dimungkinkan dengan menggunakan pemrosesan sinyal yang canggih dan kuat dalam kemudi kontrol.

Belum ada pendekatan standar industri untuk pengendalian vektor, tetapi sistem jatuh ke dalam dua kategori besar, tergantung pada umpan balik dari encoder yang dipasang di poros untuk melacak sesaat posisi rotor. Metode yang dikenal sebagai metode langsung' sedangkan yang sepenuhnya bergantung pada model matematika motor dikenal sebagai metode 'tidak langsung'. Kedua sistem menggunakan umpan balik saat ini sebagai bagian integral dari sistem integral dari setiap pengontrol arus stator. Sistem yang langsung secara inheren lebih kuat tetapi kurang peka terhadap perubahan parameter, membutuhkan motor dan encoder yang tidak standar.

Kinerja dinamis dari penggerak vektor saat ini sangat baik, pencapaian kinerja yang luar biasa dari motor yang perilaku transien buruk merupakan tonggak utama dalam motor induksi.

KEMUDI CYCLOCONVERTER

Kami menyimpulkan dengan diskusi tentang kemudi frekuensi-variabel cycloconverter, yang tidak pernah menjadi sangat luas tetapi kadang-kadang digunakan dalam motor induksi kecepatan rendah yang sangat besar atau kemudi motor sinkron. Cyclocoonverter hanya mampu menghasilkan bentuk gelombang keluaran yang dapat diterima pada frekuensi jauh dibawah frekuensi listrik, tetapi dengan fakta bahwa layak untuk membuat motor induksi atau sinkron yang besar dengan kutub tinggi (misalnya. 20) berarti bahwa sangat rendah kemudi kecepatan langsung (direct-speed) menjadi praktis. Motor 20-kutub, misalnya akan memiliki kecepatan sinkron hanya 30 putaran/menit pada 5 Hz, sehingga cocok untuk penggulung tambang, kiln, penghancur, dan lain-lain.

Sebagian besar sumber frekuensi-variabel yang dibahas dalam buku ini telah digambarkan sebagai inverter karena mereka mengubah daya dari de ke ac. Daya biasanya berasal dari catu daya frekuensi tetap, yaitu pertama kali diperbaiki untuk memberikan tahap menengah 'de-link' yang kemudian untuk membentuk keluaran frekuensi variabel. Sebaliknya cycloconverter adalah converter 'langsung' yaitu tidak memiliki de. Sebagai gantinya tegangan keluaran disintesis dengan mengalihkan beban secara langsung melintasi fasa dimanapun dari induk yang memberikan perkiraan waktu terbaik terhadap tegangan beban yang diinginkan. Keuntungan utama dari cycloconverter adalah bahwa perangkat yang diubah secara alami (thyristor) dapat digunakan sebagai pengganti perangkat inti komutasi (self-commutating), yang berarti bahwa

biaya setiap perangkat lebih rendah dan kekuatan yang lebih tinggi dapat dicapai. Pada prinsipnya cycloconverter dapat memiliki kombinasi nomor fasa masukan dan keluaran, tetapi dalam praktiknya masukan 3 fasa, versi keluaran 3 fasa digunakan untuk kemudi, terutama dalam jumlah kecil dengan kekuatan tertinggi (misalnya. 1 MW ke atas).

Buku teks sering menyertakan diagram rangkaian cycloconverter yang rumit dan membingungkan yang tidak banyak membntu pengguna yang ingin memhami cara kerja sistem seperti ini. Pemahaman kami dapat diredakan dengan rangkaian konversi daya untuk masingmasing dari tiga fasa keluaran adalah sama, sehingga kami dapat mempertimbangkn pertanyaan yang lebih sederhana tentang bagaimana mendapatkan frekuensi variabel, catu tegangan variabel, cocok untuk motor induksi satu fasa dari catu frekuensi 3-fasa dan tegangan konstan. Ini juga akan membantu kita untuk mengingat bahwa cycloconverter hanya digunakan untuk mensintesis frekuensi keluaran yang rendah dibandingkan dengan frekuensi listrik. Misalnya dengan catu 50Hz, kita dapat berharap untuk dapat mencapai perkiraan yang cukup memuaskan untuk tegangan keluaran sinusoidal untuk frekuensi dari de nol hingga sekitar 15Hz; tetapi pada frekuensi yang lebih tinggi distorsi harmonik dari bentuk gelombang sangat buruk sehingga motor induksi yang biasanya toleran akan ditolak.

Untuk memahami mengapa kita menggunakan konfirmasi rangkaian elektronik daya tertentu, pertama-tama kita perlu menjawab pertanyaan tentang kombinasi tegangan dan arus apa yang akan diperlukan dalam beban. Disini beban adalah motor induksi, dan kita tahu bahwa dibawah kondisi catu sinusoidal faktor daya bervariasi dengan beban tetapi tidak pernah mencapai kesatuan. Dengan kata lain, arus stator tidak pernah sefasa dengan tegangan stator. Jadi selama setengah siklus positif dari gelombang tegangan akan positif untuk beberapa waktu, sementara selama setengan siklus arus tegangan akan negatif untuk beberapa waktu dan positif untuk sisa waktu. Ini berarti bahwa catu ke motor harus mampu menangani kombinasi tegangan dan arus positif dan negatif.

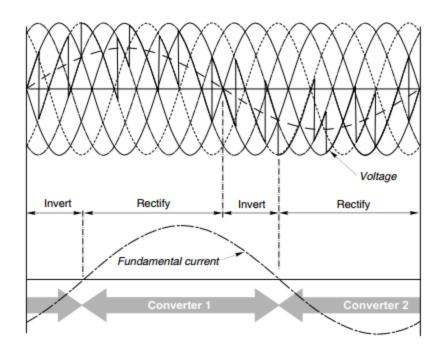
Kami telah menjelajahi cara mencapai tegangan variabel catu dc, yang dapat menangani arus posistif dan negatif. Kami melihat bahwa yang diperlukan adalah dua konverter 3 fasa yang dikontrol penuh terhubung kembali ke belakang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.8. Dengan memvariasikan sudut tunda dari thyristor jembatan arus positif dapat menghasilkan kisaran tegangan keluaran rat-rata dc dari maksimum posistif, melalui nol, ke maksimum negatif;

dan juga jembatan arus negatif dapat memberikan kisaran yang sama dari tegangan keluaran ratarata dari maksimum negatif ke maksimum positif. Jenis tegangan keluaran de selama rentang sudut dari α =0° (maksimum tegangan de) ke α =90° (tegangan de sudut nol).

Pada bagian ini kami ingin memberikan tegangan keluaran frekuensi rendah (lebih disukai sinusoidal) untuk motor induksi, dan sarana untuk melakukan ini sekarang harus lebih jelas. Setelah kita memiliki konverter thyristor ganda dan dengan asumsi untuk saat ini bahwa bebannya resistif, kita dapat menghasilkan tegangan keluaran sinusoidal frekuensi rendah hanya dengan memvariasikan sudut jembatan arus positif sehingga tegangan keluararanya meningkat dari nol secara sinusoidal sehubungan dengan waktu. Kemudian ketika kami telah menyelesaikan setengah siklus positif dan kembali ke tegangan nol, kami membawa jembatan negatif dan menggunakanya untuk menghasilkan setengah siklus negatif dan sebagainya.

Dalam prakteknya, seperti yang telah kita lihat diatas beban motor induksi listrik tidak murni resistif, sehingga lebih rumit, karena seperti yang kita lihat sebelumnya untuk beberapa bagian dari setengah siklus positif dari gelombang tegangan keluaran arus motor akan menjadi negatif. Arus negatif ini hanya dapat di catu oleh jembatan arus negative, awalnya untuk memberikan tegangan positif, tetapi kemudian ketika arus menjadi negatif selama arus tetap kontinu bentuk keluaran gelombang tegangan yang disintesis akan secara khusus ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Kita melihat bahwa keluaran gelombang tegangan terdiri dari potongan-potongan tegangan listrik yang masuk, dan bahwa ia menawarkan perkiraan yang wajar untuk gelombang sinus frekuensi dasar yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 2.9. Bentuk keluaran gelombang tegangan keluaran tidak lebih buruk daripada bentuk gelombang tegangan dari dc (lihat Gambar 2.2), dan seperti yang kita lihat dalam konteks itu, bentuk gelombang saat ini pada motor akan jauh lebih lancar dari pada tegangan, karena aksi penyaringan induktansi kebocoran stator. Karena itu kinerja motor akan dapat diterima, meskipun ada kerugian bertambah yang timbul dari komponen harmonik yang tidak diinginkan. Kami harus mencatat bahwa, karena setiap fasa dicatu dari konverter ganda, motor dapat berenegerasi saat diperlukan (misalnya. Untuk mengembalikan energi kinetik ke catu ketika frekuensi diturunkan untuk mengurangi kecepatan). Ini adalah salah satu keunggulan utama dari cycloconverter.



Gambar 2.9 Bentuk gelombang tegangan keluaran untuk satu fasa dari cycloconverter enam-pulsa yang mencatu beban induktif motor.

Frekuensi keluaran yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 adalah sepertiga dari frekuensi listrik, dan amplitude komponen dasar dari tegangan keluaran ditunjukkan oleh garis putus-putus adalah 75% dari maksimum yang dapat diperoleh. Komponen dasar dari arus beban ditunjukkan untuk menentukan mode operasi konverter.

Tidak perlu masuk detail tentang bagaimana menerapkan skema sudut, tetapi harus jelas bahwa dengan memvariasikan amplitude dan frekuensi sinyal referensi ke kontrol sudut kita dapat mengharapkan tegangan keluaran bervariasi. Kami kemudian memiliki kemampuan untuk menjaga rasio tegangan frekuensi konstan, sehingga fluks pada motor induksi tetap konstan dan kami memperoleh karakteristik torsi konstan. Juga harus jelas dari Gambar 2.9 bahwa ketika frekuensi keluaran dinaikkan menjadi semakin sulit untuk mencapai perkiraan yang wajar terhadap gelombang sinus, karena terlalu sedikit 'sampel' tersedia di setiap setengah siklus keluaran. Karenanya cycloconverter jarang dioperasikan pada lebih dari sepertiga frekuensi listrik.

Dengan konfigurasi yang dijelaskan diatas, setiap fasa motor membutuhkan konverter jembatan ganda yang terdiri dari 12 thyristor, sehingga cycloconverter lengkap membutuhkan 36 thyristor. Untuk menghindari hubung pendek antara saluran listrik yang masuk, ketiga belitan fasa

motor harus diisolasi satu sama lain (yaitu motor tidak dapat dihubungkatn dengan gaya bintang atau delta konvensional, tetapi harus memiliki kedua ujung dari masing-masing lilitan) atau masing-masing konverter ganda dapat dicatu dari transformator sekunder yang terpisah. Dalam prakteknya ada beberapa konfigurasi rangkaian daya yang dapat digunakan dengan motor terhubung dengan bintang, dan yang berada secara detail dari pengaturan yang dijelaskan diatas, tetapi semua membutuhkan jumlah thyristor yang sama untuk mencapai bentuk gelombang yang ditunjukkan pada Gambar 1.9. Bentuk gelombang ini disebut sebagai 6-pulsa karena keluaran memiliki enam pulsa per siklus listrik. Bentuk gelombang (3-pulsa) yang lebih buruk diperoleh dengan 18 thyristor, sedangkan bentuk gelombang (12-pulsa) yang jauh lebih baik dapat diperoleh dengan menggunakan 72 thyristor.

REVIEW PERTANYAAN

- Motor induksi 2-kutub, 440 V, 50 Hz mengembangkan torsi terukur pada kecepatan 2960 putaran/menit; arus stator dan rotor yang sesuai masing-masing adalah 60 A dan 150 A. jika tegangan dan frekuensi stator disesuaikan sehingga fluks tetap konstan, hitung kecepatanya dimana torsi penuh dikembangkan ketika catu frekuensi adalah (a) 30 Hz, (b) 3 Hz
- 2. Perkiraan arus stator dan rotor dan frekuensi rotor untuk motor tersebut pada pertanyaan 1 pada 30Hz dan pada 3 Hz
- 3. Apa itu penguat tegangan dalam inverter sumber tegangan dan mengapa itu perlu?
- 4. Motor induksi dengan kecepatan sinkron Ns menggerakkan beban torsi konstan pada frekuensi dasar, dan slip 5%. Jika catu frekuensi digandakan, tetapi tegangannya tetap sama, perkirakan kecepatan slip baru dan presentase slip baru.
- 5. Kira-kira bagaimana efisiensi menggunakan inverter motor diharapkan bervariasi antara kecepatan penuh (basis), kecepatan 50% dan kecepatan 10% dengan asumsi bahwa torsi beban konstan pada 100% pada semua kecepatan dan efisiensi pada kecepatan dasar 80%.
- 6. Mengapa tidak motor induksi standar yang menggerakkan beban torsi tinggi terus berjalan pada kecepatan rendah?
- 7. Masalah apa yang mungkin ada dalam menggunkan inverter tunggal untuk mencatu lebih dari satu motor induksi dengan maksud untuk mengendalikan kecepatan semuanya secara bersamaan?

- 8. Jelaskan secara singkat mengapa motor induksi menggunakan inverter akan mengahasilkan lebih banyak torsi awal per ampere arus catu dari pada motor yang sama jika dihubungkan langsung ke catu utama. Mengapa ini menjadi sangat penting jika impedansi catu tinggi?
- 9. Mengapa konten harmonik dari gelombang arus motor induksi menggunakan inverter kurang dari konten harmonik dari bentuk gelombang tegangan?
- 10. Kemudi motor induksi dengan menggunakan inverter memiliki kontrol loop tertutup dengan umpan balik tacho. Motor awalnya dalam keadaan diam, dan diturunkan. Grafik sketsa yang menunjukka bagaimana tegangan dan frekuensi stator dan kecepatan slip bervariasi dengan permintaan 150% dari kecepatan dasar jika (a) kemudi diprogram untuk berjalan dengan kecepatan lambat (misalnya dalam 10 detik); (B) kemudi deprogram untuk menjalankan hingga kecepatan secepat mungkin.

SYNCHRONOUS, BRUSHLESS D.C DAN PENYAKELARAN DRIVE RELUCTANCE

PENDAHULUAN

Dalam buku ini fitur umum yang menghubungkan motor adalah bahwa semuanya motor ac, dimana daya listrik yang diubah menjadi daya mekanik yang dimasukan ke stator, jadi sepertihalnya motor induksi, tidak ada kontak geser di rangkaian daya utama. Kami melihat motor yang untuk dioperasikan langsung dari catu listrik yaitu 50 atau 60 Hz. Motor motor ini dikenal sebagai motor sinkron dan memberikan kecepatan yang konstan, spesifikasi dan berbagai muatan yang konstan, dan karenanya digunakan dalam preferensi untuk motor induksi ketika operasi kecepatan konstan sangat penting. Mesin seperti itu tersedia dalam rentang yang sangat luas, dari versi fasa tunggal kecil pada pengaturan waktu domestik hingga mesin multi megawatt dalam aplikasi industri besar seperti kompresor gas. Kerugian utama mereka adalah bahwa jika torsi beban menjadi terlalu tinggi, motor akan tiba-tiba kehilangan sinkronisasi dan kemacetan.

Untuk mengatasi batasan kecepatan tetap yang dihasilkan dari frekuensi konstan, kemudi motor sinkron kecepatan terkontrol cukup menggunakan inverter frekuensi variabel untuk menyediakan variasi kecepatan sinkron. Kemudi loop terbuka ini akan dibahas selanjutnya. Kami kemudian melihat bahwa mungkin lebih baik disebut sebagai kemudi sinkron-mandiri, yang berpotensi adanya persaingan untuk tegangan dc dan kemudi motor induksi. Pada kemudi ini motor pada dasarnya adalah motor sinkron dengan stator fed dari variabel frekuensi inverter, tetapi frekuensi ditentukan oleh sinyal kecepatan dari tranduser yang dipasang pada rotor.

Pengaturan loop tertutup ini memastikan bahwa motor tidak akan pernah kehilangan sinkronisasi, oleh karena itu namanya "*self syncron*". Diantara kategori ini adalah disebut kemudi "brushless dc" dimana motor dirancang khusus untuk beroprasi dari konverternya sendiri, dan tidak dapat dicatu langsung dari catu listrik konvensional.

Akhirnya, tambahan terbaru untuk keluarga kemudi industri dengan pengaktivan reluktansi kemudi dibahas secara singkat. Motor reluktansi yang diaktifkan mungkin adalah yang paling sederhana dari semua mesin listrik, tetapi itu hanya dengan munculnya pensaklaran powerelektronik dan kontrol digital yang canggih yang potensinya dapat sepenuhnya ditunjukkan.

MOTOR MOTOR SINKRON

Gulungan stator 3-fasa dari motor induksi menghasilkan magnet putar sinusoidal di celah udara. Kecepatan rotasi bidang (kecepatan sinkron) terbukti berbanding lurus dengan frekuensi catu dan berbanding terbalik dengan jumlah kutub belitan. Kita juga melihat bahwa dalam motor induksi rotor diseret oleh medan, tetapi semakin tinggi beban pada poros, semakin banyak rotor yang harus melepaskan dengan medan untuk menginduksi arus rotor yang diperlukan untuk menghasilkan torsi. Jadi meskipun tanpa beban, kecepatan rotor dapat mendekati kecepatan sinkron, namun harus selalu kurang; dan ketika beban meningkat kecepatan harus turun.

Pada motor sinkron, belitan stator persis sama dengan motor induksi, jadi ketika terhubung ke catu 3 fasa, dihasilkan medan magnet putar. Tetapi memiliki rotor silinder dengan belitan sangkar, motor sinkron memiliki belitan rotor dc, atau magnet permanen, yang dirancang untuk menyebabkan rotor 'lock-on' atau 'synchronise' medan magnet berputar yang dihasilkan oleh stator. Setelah rotor disinkronkan ia akan berjalan pada kecepatan yang sama persis dengan medan putar meskipun variasi beban, sehingga dibawah operasi frekuensi konstan, kecepatan akan tetap konstan selama frekuensi catu stabil.

Seperti yang ditunjukkan sebelumnya, kecepatan sinkron (dalam putaran/menit) diberikan oleh

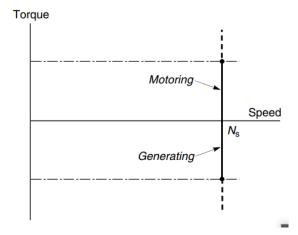
$$N_{\mathcal{S}} = \frac{120f}{p} \tag{3.1}$$

Dimana f adalah frekuensi catu dan p adalah nomor kutub lilitan. Oleh karena itu untuk motor industri, dua, empat dan enam kutub, kecepatan kerja pada catu 50 Hz adalah 3000, 1500 dan 1000 putaran/menit, sedangkan pada catu 60 Hz, masing-masing menjadi 3600, 1800 dan 1200 putaran/menit. Pada ekstrim yang lain, motor kecil di penghitung waktu pemanasan sentral dengan rotor berbentuk cawan dengan 20 jari yang memproyeksikan secara aksial dan sebuah kumparan bundar di tengah adalah motor sinkron 20-kutub relaktansi yang akan berjalan pada 300

putaran/menit ketika diumpankan dari 50 Hz. Pengguna yang menginginkan kecepatan berbeda dari ini akan kecewa, kecuali mereka siap untuk berinyestasi dalam inverter frekuensi-variabel.

Kami membahas mekanisme serupa dimana rotor terkunci pada medan magnet, tetapi disana medan menghasilkan secara bertahap. Dengan mesin sinkron kami kembali menemukan bahwa, seperti pada stepper, ada batas torsi maksimum (*pull-out*) yang dapat dikembangkan sebelum rotor dipaksa keluar dari sinkronisme dengan medan yang berputar. Torsi penarikan (*pull-out*) ini biasanya 1,5 kali dari torsi terukur terus menerus, tetapi untuk semua torsi dibawah penarikan, kecepatan akan benar-benar konstan. Karenanya kurva torsi kecepatan hanyalah garis vertical pada kecepatan sinkron, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Kita dapat melihat dari Gambar 10.1 bahwa garis vertical memanjang ke kuadran 2, yang menunjukkan bahwa jika kita mencoba untuk memaksa kecepatan diatas kecepatan sinkron, mesin akan bertindak sebagai generator.

Motor sinkron sumber daya utama jelas ideal dimana kecepatan konstan sangat penting, dan juga dimana beberapa motor harus berjalan pada kecepatan yang sama persis. Contoh dimana motor 3-fasa digunakan termasuk garis pemintalan serat buatan dan pengangkutan film dan pita. Versi reluktansi fasa tunggal digunakan dalam jam dan timer untuk mesin cuci, sistem pemanas, dll. Versi ini juga digunakan dimana rasio kecepatan integral yang tidak terpelihara harus diperthankan: misalnya, rasio kecepatan 3:1 dapat dijamin dengan menggunakan 2-kutub dan motor 6-kutub dicatu dari catu yang sama.



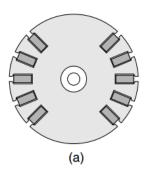
Gambar 3.1 Kurva kecepatan torsi-tunak untuk motor sinkron yang dicatu pada frekuensi konstan.

Kita sekarang akan melihat secara singkat berbagai jenis motor sinkron, dengan menyebutkan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Tipe *exited-rotor* diberikan paling berat tidak hanya karena pentingnya dalam ukuran besar tetapi juga karena perilakunya dapat dianalisis, dan mekanisme operasinya melalui rangkaian ekivalen yang relatif sederhana. Paralel digambar dengan kedua dc motor dan motor induksi untuk menekankan bahwa meskipun perbedaanya jelas, kebanyakan mesin listrik juga memiliki kesamaan yang istimewa.

Motor Motor Keluar Rotor Exited-Rotor

Rotor membawa belitan'medan' yang dicatu dengan arus searah melalui sepasang slip pada poros, dan dirancang untuk menghasilkan bidang celah udara dengan nomor kutub yang sama dan distribusi spasial (biasanya sinusoidal) seperti yang dihasilkan oleh stator. Rotor mungkin lebih atau kurang silindris dengan belitan medan didistribusikan dalam slot (lihat Gambar 10.2 (a)), atau mungkin memiliki tiang yang menonjol disekitar belitan terkonsentrasi (lihat Gambar 3.2 (b)). Seperti yang dibahas dalam bagian 3.2, motor silinder-rotor memiliki sedikit atau sedikit reluktansi torsi, sehingga hanya dapat menghasilkan torsi ketika arus dimasukkan kedalam rotor. Disis lain tipe kutub yang menonjol juga menghasilkan beberapa relaktansi torsi bahkan ketika belitan rotor tidak memiliki arus. Namun dalam kedua kasus daya rotor 'eksitasi' relatif kecil karena semua daya keluaran mekanis di catu dari sisi stator.

Motor motor digunakan dalam ukuran mulai dari beberapa kW hingga beberapa MW. Yang besar adalah alternator yang efektif (seperti yang digunakan untuk pembangkit listrik) tetapi digunakan sebagai motor. Motor induksi luka-rotor juga dapat dibuat untuk beroperasi secara sinkron dengan mencatu rotor dengan de melalui sliprings.





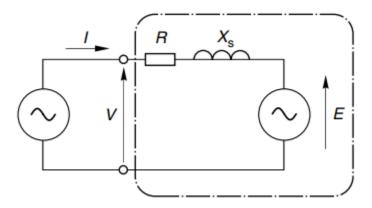
Gambar 3.2 Rotor-rotor untuk motor sinkron, silindris 2-kutub (a) dengan kumparan medan didistribusikan dalam slot dan kutub yang menonjol 2-kutub (b) dengan belitan medan terkonsentrasi

Cara paling sederhana untuk memvisualisasikan mekanisme produksi torsi adalah dengan fokus pada gambar statis, dan mempertimbangkan gaya penyelelarasan antara pola medan stator dan rotor. Ketika keduanya sejajar dengan N yang menghadap S, torsi adalah nol dan sistem berada dalam kesetimbangan stabil dengan perpindahan kekakan atau kiri yang menyebabkan torsi pemulihan ikut berperan. Jika medan didistribusikan secara sinusoidal, torsi yang dipulihkan akan mencapai maksimum ketika kutub tidak selaras dengan setengah kutub pitch atau 90°. Di luar 90° torsi berkurang dengan sudut memberikan daerah yang tidak stabil, torsi nol tercapai lagi ketika N berlawanan dengan N.

Ketika motor berjalan secara serempak, kita dapat menggunakan banyak gambaran yang sama karena medan yang dihasilkan oleh arus bolak balik 3-fasa dalam belitan stator berputar dengan kecepatan yang persis sama dengan medan yang dihasilkan oleh arus dc di rotor tanpa beban. Ada sedikit perpindahan sudut antara pola medan, karena torsi yang diperlukan untuk mengatasi gesekan kecil. Tetapi setiap kali beban meningkat, rotor melambat sesaat sebelum mengendap pada kecepatan asli tetapi dengan perpindahan antara dua pola medan yang cukup untuk melengkapi torsi yang dibutuhkan untuk menjalankan kondisi tunak. Sudut ini dikenal sebagai 'sudut beban' dan kita dapat melihatnya ketika kita menerangi poros motor dengan stroboskop frekuensi listrik: tanda referensi pada poros terlihat turun kembali beberapa derajat setiap kali beban meningkat.

Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron Diluar Rotor

Memprediksi arus dan faktor daya yang diambil dari listrik dengan motor sinkron silindrisrotor dimungkinkan dengan menggunakan per-fasa ac yang sangat sederhana. Rangkaian ekuivalen ditunjukkan pada Gambar 10.3. Dalam rangkaian ini X_s (dikenal sebagai reaktansi sinkron) mewakili reaktansi induktif yang efektif dari belitan fasa stator; R adalah hambatan belitan stator; V tegangan yang diberikan dan E e.m.f diinduksi dalam belitan stator oleh bidang berputar yang diproduksi oleh dc arus pada rotor. (untuk pembaca yang menangani Bab 7, harus ditunjukkan bahwa X_s secara efektif sama dengan jumlah dari reaktansi magnetisasi dan kebocoran yaitu $X_s = X_m + X_1$, tetapi karena celah udara pada mesin sinkron biasanya lebih besar dari pada di motor induksi, reaktansi sinkron per unitnya biasanya lebih rendah dari pada mesin induksi dengan belitan stator yang sama).



Gambar 10.3 Rangkaian ekuivalen untuk motor sinkron

Kesamaan diantara rangkanai dari mesin dc (lihat Gambar 3.6) dan motor induksi (lihat Gambar 5.8) jelas dan itu berasal bahwa mesin-mesin ini menghasilkan torsi dengan interaksi medanmagnet dan konduktor pembawa arus (yang disebut efek "BII"). Dalam kasus motor dc induktansi dianggap tidak penting dalam kondisi tunak, karena arus stabil, dan hambatan muncul sebagai parameter dominan. Dalam kasus motor sinkron arus berganti pada frekuensi listrik, reaktansi sinkron adalah impedansi dominan dan tahanan hanya memainkan peran kecil.

Pada titik ini pembaca yang belum terbiasa dengan teori rangkaian ac dapat diyakinkan bahwa mereka tidak akan dirugikan secara serius dengan melewatkan bagian ini dan berikutnya.

Diskusi tentang rangkaian ekuivalen dan diagram fasor yang terkait sangat membant pemahaman perilaku motoric, terutama kemampuannya untuk beroperasi pada berbagai factor daya.

Tujuan kami adalah untuk menemukan arus yang diambil dari listrik, dari Gambar 3.3 jelas tergantung pada semua parameter didalamnya. Tetapi untuk mesin tertentu yang beropersi dari tegngan konstan, catu frekuensi konstan, satu satunya variabel adalah beban pada poros dan arus dc dimasukkan ke dalam rotor, jika kita akan melihat pengaruh keduanya, dimulai dengan efek beban pada poros.

Kecepatanya konstan dan oleh karena itu daya keluaran mekanis (kecepatan waktu torsi) sebanding dengan torsi yang diproduksi, yang dalam kondisi sama dan berlawanan dengan torsi beban. Karenanya jika kita mengabaikan losses pada motor, daya input listrik juga ditentukan oleh beban dan poros. Daya input per fasa diberikan oleh VI cos f, dimana I adalah arus dan sudut factor daya adalah f. tetapi V tetap, sehingga komponen fasa-in (atau nyata) dari arus input (I cos f) ditentukan oleh beban mekanis pada poros. Kita ingat bahwa dengan cara yang sama arus dalam motor dc (lihat Gambar 3.6) ditentukan oleh beban. Diskusi ini mengingatkan kita bahwa meskipun rangkaian ekivalen pada Gambar 3.3 dan 3.6 sangat informatif. Mereka harus membawa 'health warning' yang menyatakan bahwa satu-satunya penentu paling penting dari arus (torsi beban) sebenarnya tidak muncul secara ekplisist pada diagram.

Beralih sekarang ke pengaruh ektensi arus dc, pada frekuensi catu yang diberikan (misalnya. Kecepatan) induk-fekuensi e.m.f.,(E) yang diinduksi dalam stator sebanding dengan dc arus medan dimasukkan kedalam rotor. (jika kita ingin mengukur ggl ini, kita dapat memutus gulungan stator dari catu, menggerakan rotor dengan kecepatan sinkron dengan cara eksternal, dan mengukur tegangan pada terminal stator, yang disebut tes 'rangkaian terbuka'. Jika kita memvariasikan kecepatan diman kita mengendarai rotor, menjaga arus medan konstan, kita tentu saja menemukan bahwa E sebanding dengan kecepatan. Kami menemukan keadaan yang sangat mirip ketika kami mempelajari motor dc: yang diinduksi 'back e.m.f.' (E), ternyata sebanding dengan arus medan, dan dengan kecepatan rotasi dynamo. Perbedaan utama antara motor dc dan motor sinkron adalah bahwa motor dc medan stasioner dan armature berputar, sedangkan dimotor sinkron sistem medan berputar sementara belitan stator diam: dengan kata lain orang dapat menggambarkan motor sinkron dengan bebas sebagai 'inside-out' motor dc.

Ketika motor dc terhubung ke catu tegangan konstan, itu berlari pada kecepatan sehingga diinduksi e.m.f sm dengan tegangan catu, sehingga arus tanpa beban hamper nol. Ketika beban diterapkan pada poros, kecepatan turun, sehingga mengurangi E dan meningkatkan arus yang ditarik dari catu sampai torsi motor yang dihasilkan sama dengan torsi beban. Sebaliknya jika kita menerapkan torsi beban. Sebaliknya jika kita menerapkan torsi penggerak ke poros mesin, kecepatan naik, E menjadi lebih besar dari V, arus mengalir ke catu dan mesin bertindak sebagai generator. Temuan ini didasarkan pada asumsi bahwa arus medan tetap konstan, sehingga perubahan E adalah refleksi dari perubahan kecepatan. Kesimpulan keseluruhan kami adalah pernyataan sederhana bahwa jika E kurang dari V, maka motor dc bertindak sebagai motor, sedangkan jika E lebih besar dari V, ia bertindak sebagai generator.

Keadaan motor sinkron yang serupa, tetapi sekarang kecepatanya konstan dan kita dapat mengontrol E secara independent melalui ektensi kontrol arus fed dc ke rotor. Kita mungkin berharap bahwa jika E kurang dari V mesin akan menarik arus yang bertindak sebagai motor, dan sebaliknya jika E lebih besar dari V. Tetapi kita tidak lagi berkaitan dengan rangkaian dc dimana frasa seperti 'draw in current' memiliki arti yng jelas dalam hal yang berkaitan dengan aliran daya. Dalam rangkaian ekuivalen motor sinkron, tegangan dan arus adalah ac., jadi kita harus berhatihati dan memperhatikan besarnya arus fasa. Keadaan menjadi berbeda dari apa yang ditemukan di motor dc, tetapi ada juga kesamaanya.

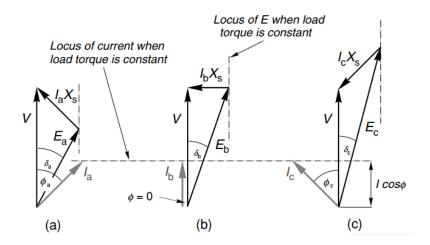
Diagram Fasor dan Kontrol Faktor Daya

Untuk melihat seberapa besar yang mempengaruhi perilaku e.m.f kita dapat memeriksa diagram fasor dari mesin sinkron yang beroperasi sebgai motor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.4. Poin pertama adalah bahwa motor sesuai dengan daya input positif ke mesin. Daya diberikan oleh $VI \cos \phi$, jadi ketika mesin sedang menggerakkan (daya positif) sudut ϕ terletak pada kisaran 90° . Mesin akan menghasilkan arus lebih lambat atau menyebabkan tegangan lebih dari 90° .

Gambar 10.4 menunjukkan tiga diagram fasor yang sesuai dengan nilai rendah, sedang dan tinggi dari induksi e.m.f, (E) beban poros (misalnya. Tenaga mekanik) menjadi konstan. Sebagaimana dibahas ditas, jika daya mekanisnya konstan, maka I $\cos \phi$ dan karenanya arus ditunjukkan oleh garis hhorisontal putus-putus. Beban sudut (d), yang dibahas pada bagian 10.2.1, adalah sudut antara V dan E dalam diagram fasor. Pada Gambar 10.4, diagram fasor tegangan

mewujudkan hokum Kirchhoff sebagaimana diterapkan pada rangkaian ekuivalen pada Gambar 10.3, yaitu $V = E + IR + jIX_s$, tetapi R diabaikan sehingga diagram fasor hanya terdiri dari volt-drop IX_s (yang mana I adalah 90^0) ditambahkan ke E untuk menghasilkan V.

Gambar 3.4 (a) mewakili suatu kondisi dimana arus medn telah di setting sehingga besarnya ggl yang diinduksi (E) lebih kecil dari V. ini disebut kondisi 'underexited', dan seperti dapat dilihat saat ini tegangan terminal dan factor daya adalah $\cos \phi_a$ ketika arus medan meningkat (meningkatkan besarnya E), besarnya arus input berkurang. Kasus khusus yang ditunjukkan pada gambar 10.4 (b) menunjukkaan bahwa motor dapat dioperasikan dengan daya satu factor jika arus medan dipilih secara tepat. Akhirnya, pada Gambar 3.4 (c), arus medan jauh lebih tinggi ('overexited' case) yang menyebabkan arus meningkat lagi, tetapi kali ini arus menyebabkan tegangan dan factor daya adalah $\cos \phi_c$ kami melihat bahwa kami dapat memperoleh factor daya yang diinginkan dengan pilihan eksitasi rotor yang tepat, dan khususnya kami dapat beroperasi dengan factor daya terkemuka. Ini adalah kebebasan yang tidak diberikan kepada pengguna motor induksi, dan muncul karena mesin sinkron ada mekanisme tambahan untuk memberikan eksitasi, seperti yang akan kita lihat sekarang.



Gambar 3.4 Diagram fasor untuk motor sinkron yang beroperasi dengan torsi beban konstan, untuk tiga nilai arus rotor (eksitasi) yang berbeda

Ketik kami mempelajari motor induksi kami menemukan bahwa besarnya catu frekuensi dan tegangan mengatur besarnya kerapatan fluks gelombang yang dihasilkan dalam mesin, bahawa arus yang ditarik oleh motor dapat dianggap terdiri dari dua komponen. Komponen (in-phase) memiliki kekuatan nyata yang dikonversi dari bentuk listrik ke bentuk mekanis, sehingga

komponen ini bervariasi sesuai dengan bebanya. Di sisi lain komponen reaktif mewakili arus 'magnetisasi' yang bertanggung jawab untuk menghasilkan fluks, dan tetap konstan terlepas dari beban.

Gulungan stator pada motor sinkron sama dengan motor induksi, sehingga diharapkan bahwa fluks yang dihasilkan akan ditentukan oleh besarnya frekuensi dan tegangan yang diberikan. Flukd ini akan tetap konstan terlepas dari beban, dan akan ada persyaratan terkait untuk menarik MMF. Tapi sekarang kami memiliki dua kemungkinan cara untuk menyediakan ektensi MMF yaitu arus de dimasukkan ke dalam rotor dan komponen yang kurang dari ac saat ini ada di stator.

Ketika rotor kurang dieksitasi misalnya induksi e.m.f E kurang dari V (Gambar 10.4 (a)), arus stator memiliki komponen lagging untuk melengkapi kekurangan dalam eksitasi yang diperlukan untuk menghasilkan medan seperti yang ditentukan oleh terminal tegangan V. dengan lebih banyak medan arus (Gambar 3.4(b)), namun eksitasi rotor saja sudah cukup dan tidak ada arus lagging yang ditarik oleh stator. Dalam kasus overexcited (Gambar 3.4 (c)), terdapat begitu banyak rotor eksitasi sehingga ada beberapa daya reaktif yang efektif dan factor daya utama mewakili daya reaktif yang tertinggal yang dapat digunaan untuk menyediakan eksitasi untuk motor induksi ditempat lain pada sistem yang sama.

Untuk menyimpulkan pandangan kami pada motor sinkron, kami sekarang dapat mengukur kualitatif dari produksi torsi yang diperkenalkan pada bagian 3.2.1 dengan mencatat dari diagram fasor bahwa jika daya mekanik (yaitu torsi beban) konstan, variasi sudut beban (δ) dengan E sedemikian rupa sehingga E sin δ tetap konstan. Ketika eksitasi rotor berkurang dan E menjadi lebih kecil, sudut beban meningkat hingga maksimum 90° , dimana titik rotor akan kehilangan sinkronisme dan kemacetan. Ini berarti bahwa akan selalu ada batas yang lebih rendah untuk eksitasi yang diperlukan mesin untuk dapat mengirimkan torsi yang ditentukan. Inilah gambaran sederhana tentang torsi yang dikembangkan antara dua medan magnet.

Starting

Didkusi tentang bagaimana torsi dihasilkan, kecuali jika rotor berjalan pada kecepatan sama dengan medan putar, tidak ada torsi stabil yang dapat dihasilkan. Jika rotor berjalan pada kecepatan yang berbeda, kedua bidang akan meluncur melewati satu sama lain, sehingga

menimbulkan torsi yang berubah dengan nilai rata-rata nol. Oleh karena itu dasar mesin sinkron tidak bias berjalan secara sendri, dan sehingga diperlukan beberapa mtode untuk menghasilkan torsi run-up.

Oleh karena itu, kebanyakan motor sinkron dilengkapi dengan beberapa bentuk sangkar rotor, mirip dengan motor induksi, selain lilitan medan utama. Ketika motor dialihkan ke catu utama, ia beroperasi sebagai motor induksi selama fasa run-up, sampai kecepatan tepat dibawah sinkron. Eksitasi kemudian dinyalakan sehingga rotor mampu melakukan akselerasi akhir dan 'pull-in' untuk sinkronisasi dengan bidang berputar. Karena sangkar hanya diperlukan saat mulai, dapat diberi nilai waktu yang singkat dan karena itu relatif kecil. Setelah rotor disinkronkan dan beban stabil, tidak ada arus yang diinduksi dalam sangkar, karena slip adalah nol. Namun demikian, sangkar ikut berperan ketika beban berubah, ketika ia menyediakan metode yang efekti untuk meredam osilasi rotor saat ia mengendap pada sudut beban kondisi-mapan yang baru.

Motor besar akan cenderung menarik arus yang sangat deras saat run-up, beberapa bentuk starter tegangan rendah sering diperlukan. Kadang-kadang, motor induksi kecil yang terpisah digunakan hanya untuk menjalankan motor utama sebelum sinkronisasi, tetapi ini hanya layak di ana beban tidak dapat diterapkan sampai setelah motor utama disinkronkan.

Tidak perlu starter khusus untuk motor induksi (wound-rotor) sehingga tentu saja akan berjalan dengan cara yang biasa sebelum D-C eksitensi ditepkan. motor dioperasikan seperti ini kadang-kadang dikenal sebagai 'Inductosyns'.

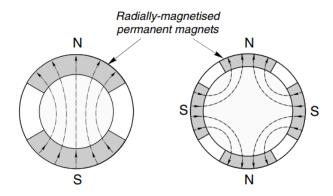
Permanen Magnet Motor Sinkron

Permanen magnet digunakan pada rotor: tipe yang dipasang dipermukaan 2-kutub dan 4-kutub ditunjukkan pada Gambar 3.5, arah medan magnet diwakili oleh panah. Motor jenis ini memiliki keluaran mulai dari sekitar 100 W hingga mungkin 100 kW.

Untuk memulai dari catu frekuensi tetap, sehingga memperlukan sangkar rotor seperti yang dibahas di atas. Keuntungan jenis permanen magnet adalah tidak ada catu yang diperlukan untuk rotor dan kontruksi rotor dapat menjadi kuat dan dapat diandalkan. Keruginnya adalah memperbaiki eksitasi, sehingga perancangan harus memilih bentuk dan disposisi magnet agar

sesuai dengan persyaratan satu beban tertentu, untuk tujuan umum. Kontrol faktor daya melalui eksitasi tidak memungkinkan dilakukan.

Awalnya motor permanen magnet mempunyai kekrangan yaitu memiliki arus stator tinggi pada saat start, dan suhu yang diizinkan terbatas. Versi yang jauh lebih baik dengan mengunakan magnet bumi, dengan koefisitas tingi dikembangkan selama 1970-an. Untuk mengatasi masalah ini mereka menggunkan motor yang disebut 'line-start untuk menunjukkan bahwa dirancang untuk langsung start-on-line. Efisiensi dan kondisi tunak pada beban penuh dalam banyak kasus lebih baik daripada motor induksi setaa, dan mereka dapat menarik ke sinkronisme dengan beban inersia rotor.



Gambar 3.5 Permanen magnet motor. 2-pole(kiri); 2-pole(kanan)

Motor-Motor Histeresis

Sementara sebagian besar motor dapat dengan mudan diidentifikasi dengan inspeksi ketika dibongkar, motor histerisis cenderung membingungkan siapa saja yang belum pernah menemukannya. Rotor hanya terdiri dari silinder berdinding tipis dari apa yang tampak seperti baja, sedangkan stator memiliki belitan fasa tunggal atau 3 fasa konvensional. Bukti magnet yang sangat lemah mungkin hanya dapat didekati pada rotor,tetapi tidak ada tanda-tanda magnet tersembunyi. Namun motor berjalan dengan kecepatan konstan dan pada kecepatan sinkron tanpa ada tanda transisi dari induksi ke operasi sinkron.

Motor motor ini (operasi yang cukup kompleks) terutama mengandalkan sifat khusus dari lengan rotor, yang terbuat dari baja keras yang menunjukkan hysteresis magnetic yang nyata.

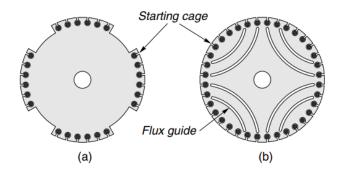
Biasanya pada mesin kami bertujuan untuk meminimalkan hysteresis pada bahan magnetic (yang mmuncul dari fakta bahwa kerapatan fluks magnetic B tergantung pada 'sejarah' MMF sebelumnya) sengaja ditekankan untuk menghasilkan torsi. Sebenarnya ada juga beberapa aksi motor induksi selama fasa run-up dan hasilnya adalah torsi tetap konstan pada semua kecepatan.

Motor hysteresis kecil digunakan secra luas, torsi konstan selama run-up dan arus awal yang sangat sederhana, berarti bahwa mereka juga cocok untuk beban inersia tinggi seperti sebagai gyrocompass dan sentrifugal kecil.

Reluctance motor

Reluktansi motor bisa disebut motor sinkron yang paling sederhana dari semuanya, rotor yang terdiri hanya dari seperangkat laminasi yang dibentuk sehingga cenderung menyelaraskan diri dengan bidang yang dihasilkan oleh stator. Tindakan'reluktansi torsi' ini dibahas ketika kami melihat motor stepping reluktansi variabel (dalam Bab 1) dan sekali lagi secara singkat dibagian 3.2

Disini kita memperhatikan reluktansi motor frekuensi utama, yang berbeda dari stepper karena mereka hanya memiliki arti penting pada rotor, stator identic dengan motor induksi 3-fasa. Faktanya karena aksi motor induksi diperlukan untuk mendapatkan rotor hingga kecepatan sinkron, rotor tipe reluktansi menyerupai sangkar induksi, dengan bagian peripheral dipotong untuk memaksa fluks dari satator untuk masuk ke dalam rotor didaerah yang tersisa dimana celah udara kecil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 (a) atau, 'preferred flux paths' dapat dikenakan dengan melepas besi didalam rotor sehingga fluks di arahkan sepanjang jalur yang diinginkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 (b).



Rotor akan cenderung menyelaraskan diri dengan medan, dan karenanya dapat tetap disinkronkan dengan medan yang diatur oleh belian 3-fasa pada stator dengan cara yang hamper sama denga rotor magnet permanen. Reluktansi motor awal selalu satu atau dua ukuran frame lebih besar dari motor induksi untuk daya dan kecepatan tertentu, dan memiliki factor daya rendah dan kinerja pull-in yang buruk. Pemahaman tentang reluktansi motor sekarang jauh lebih maju, dan mereka dapat bersaing dengan persyaratan tenaga dan efisiensi yang hampir sama dengan motor induksi dalam hal daya-keluaran. Meskipun demikian harganya relatif mahal karena tidak diproduksi dalam jumlah besar.

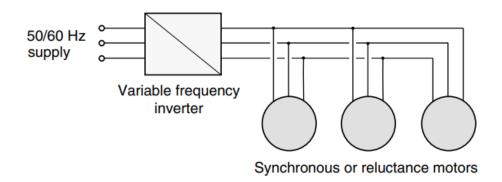
Kontrol kecepatan motor sinkron

Inverter frekuensi-variabel menjadi proposisi praktis digunakan untuk mencatu motor sinkron, dengan demikian dapat memecahkan masalah yang terakhir dari kendala kecepatan tetap yang dipaksakan oleh operasi frekuensi-utama dan membuka kemungkinan loop terbuka sederhana yang dikontrol secara cepat. Keuntungan yang jelas dibandingkan motor induksi inverter-fed adalah bahwa kecepatan motor sinkron ditentukan oleh frekuensi, sedangkan motor induksi harus selalu berjalan dengan slip yang terbatas. Sumber frekuensi osilator mengendalikan pensaklaran inverter adalah semua yang diperlukan untuk memberikan kontrol kecepatan yang akurat dengan motor sinkron, sementara umpan balik kecepatan sangat penting untuk mencapai akurasi dengan motor induksi.

Dalam praktiknya, operasi loop terbuka inverter-fed motor sinkron tidak seluas yang diharapkan, meskipun umumnya digunakan pada kemudi multi-motor. Namun demikian, operasi loop tertutup atau self-sinkronisasi mendapatkan momentum dan sudah mapan dalam dua kondisi yang berbeda diujung yang berlawanan dari beberapa ukuran. Pada kondisi ekstrim kerja rotor yang besar digunakan sebagai pengganti kemudi dc, khususnya dimana memerlukan kecepatan tinggi atau ketika motor harus beroperasi di keadaan berbahaya(misalnya dalam kompresor gas besar). Skala diujung lain, motor sinkron magnet permanen kecil digunakan pada kemudi brushless dc. Kami akan melihat aplikasi closed-loop ini setelah diskusi singkat tetang operasi loop terbuka.

Kendali Open-loop inverter-fed motor sinkron

Metode sederhana ini menarik dalam instalasi multi-motor dimana semua motor harus berjalan pada keceapatan yang persis sama. Secara individual motor (magnet permanen atau reluktansi motor) lebih mahal dari pada motor induksi yang diproduksi massal yang setara, tetapi ini diimbangi oleh fakta bahwa umpan balik kecepatan tidak diperlukan, dan semua motor dapat dicatu dari inverter tunggal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.7. Rasio frekuensi-tegangan inverter biasanya akan dijaga konstan (lihat Bab 8) untuk memastikan bahwa motor beroperasi pada fluks penuh pada semua kecepaan dan karenanya memiliki kemampuan 'torsi konstan'. Untuk operasi kecepatan rendah secara berkepanjangan membutuhkan pendingin mtor yang lebih baik. Kecepatan ditentukan dengan tepat oleh frekuensi inverter, tetapi perubahan kecepatan (termasuk run-up dari diam) harus dilakukan secara perlahan. Untuk menghindari kemungkinan melebihi sudut beban yang akan mengakibatkan kemacetan.



Gambar 3.7 Operasi loop terbuka dari sekelompok motor sinkron atau reluktansi yang dicatu dari inverter variabel frekuensi tunggal.

Masalah yang kadang-kadang dapat terjadi dengan operasi loop terbuka semacam ini adalah bahwa kecepatan motor menunjukkan osilasi spontan. Catu frekuensi mungkin benar-benar konstan tetapi kecepatan rotor terlihat berfluktuasi tentang nilai yang diharapkan (sinkron), kadang-kadang dengan amplitude yang cukup besar dan biasanya pada frekuensi rendah mungkin 1 Hz. Asal usul perilaku tidak stabil ini terletak pada kenyataan bahwa motor dan beban setidaknya merupakan sistem urutan keempat, dan karenanya dapat menjadi sangat buruk atau bahkan tidak stabil untuk kombinasi tertentu dari parameter sistem. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas adalah tegangan terminal, frekuensi catu konstantan waktu motor dan inersia beban dan redaman. Perilaku yang tidak stabil dalam pengertian yang ketat (yaitu dimana penumpukan osilasi tanpa

batas) jarang terjadi, tetapi ketidak stabilan terbatas terutama pada kecepatan jauh dibawh tingkat dasar (50Hz atau 60 Hz), dan dibawah kondisi beban. Sangat sulit untuk memprediksi dengan tepat kapan perilaku tidak stabil. Oleh karena itu beberapa inverter termasuk rangkaian yang mendeteksi arus untuk berfluktuasi dan memodulasi tegangan dan/frekuensi untuk menekan osilasi yang tidak diinginkan.

Operasi sinkronisasi otomatis (loop tertutup)

Dalam skema loop terbuka yang diuraikan diatas, frekuensi catu ke motor berada dibawah kendali independent osilator yang menggerakkan perangkat pensaklaran di inverter. Inverter tidak memiliki cara untuk mengetahui apakah rotor terkunci dengan banar pada bidang rotasi yang dihasilkan oleh stator, dan jika torsi terlampaui, motor hanya akan berhenti. Namun dalam mode self-sinkron, frekuensi keluaran inverter ditentukan oleh kecepatan rotor. Lebih tepatnya dimana perangkat pensaklaran beroperasi untuk menghidupkan dan mematikan belitan stator ditentukan oleh sinyal tergantung posisi rotor yang diperoleh dari tranduser posisi rotor (RPT) yang dipasang pada poros rotor. Dengan cara ini, arus stator selalu dinyalakan pada waktu yang tepat untuk menghasilkan torsi yang diinginkan pada rotor, karena inverter secara efektif mengetahui dimana rotor berada pada setiap saat. Penggunaan sinyal umpan balik posisi rotor untuk mengontrol inverter untuk deskripsi 'loop tertutup' yang digunakan diatas. Jika rotor melambat (sebagai akibat dari peningkatan beban) misalnya frekuensi catu stator secara otomatis berkurang sehingga rotor tetap disinkronkan dengan bidang putar, dan oleh karena itu motor tidak dapat 'pull-out', seperti itu tidak dibawah operasi loop terbuka.

Analogi dengan mesin pembakaran inernal dapat membatu memperjelas perbedaan antara operasi loop tertutup dan loop terbuka. Mesin selalu beroperasi sebagai sistem loop tertutup dalam arti bahwa pembukaan dan penutupan katup masuk dan buang secara otomatis disinkronkan dengan posisi piston melalui camshaft dan timing belt. Mesin self-sinkron sama seperti alat-alat pensaklaran pada inverter menghidupkan dan mematikan arus sesuai dengan posisi rotor. Sebliknya, operasi loop terbuka pada mesin bahwa kami telah melepas timing belt dan memilih untuk mengoperasikan katub dengan menggerakkan camshaft secara independent, dalam hal ini harus jelas bahwa mesin hanya akan mampu menghasilkan daya pada satu kecepatan dimana gerakan naik dan turun piston berhubungan persis dengan pembukaan dan penutupan katub.

Ternyata karakteristik operasi keseluruhan dari sinkronisasi motor ac sangat mirip dengan konvensional dc motor. Komutator mekanik membalikan arah arus disetiap kumparan armature (berputar) pada titik yang tepat, terlepas dari kecepatan, arus dibawah setiap kutub medan (stasioner) selalu berada diarah yang benar untuk menghasilkan torsi yang dinginkan. Pada motor sinkron, peran stator dan rotor dibalik dibandingkan dengan motor dc. Bidang ini berputar dan gulungan 'armatur' (terdiri dari tiga kelompok kumparan atau fasa) adalah diam. Waktu dan arah arus pada setiap fasa diatur oleh pensaklaran, yang pada giliranya ditentukan oleh sensor posisi rotor. Karenanya terlepas dari kecepatan, torsi selalu kearah yang benar.

Kombinasi sensor posisi rotor dan inverter berfungsi secara efektif dengan fungsi yang sama seperti komutator pada dc motor. Tentu saja biasanya hanya ada tiga belitan yang akan diaktifkan oleh inverter, dibandingkan dengan lebih banyak gulungan dan segmen komutator yang akan diaktifkan oleh sikat dc motor. Tidak mengherankan kombinasi sensor posisi dan inverter kadang-kadang disebut sebagai 'komutator elektronik', sedangkan kesamaan keseluruhan perilaku menmbulkan istilah 'elektronically commutated motor' (ECM) atau 'commutatorless d.c motor' (CLDCM) untuk menggambarkan mesin sinkron mandiri.

Karakteristik dan kontrol operasi

Jika input tegangan de ke inverter dijaga konstan dan motor mulai dari keadaan diam, pada saat mulai arus motor akan besar, tetapi akan menurun dengan kecepatan sampai e.m.f yang dihasilkan didalam motor hamper sama dengan tegangan yang diberikan. Ketika beban pada poros meningkat, kecepatan mulai turun, gerakan e.m.f berkurang dan arus meningkat hingga keseimbangan baru tercapai dimana torsi sama dengan torsi beban. Perilaku konvensional de motor parallel, dimana kecepatan tanpa beban tergantung pada tegangan. Karena itu, kecepatan motor sinkron dapat dikontrol dengan mengendalikan tegangan de ke inverter de. De link biasanya akan disediakan oleh penyearah terkontrol, sehingga kecepatan motor dapat dikendalikan dengan memvariasikan sudut converter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.

Kesamaan keseluruhan dengan kemudi de secara sengaja ditekankan pada Gambar 3.8 Garis putus-putus yang melampirkan motor ac bersama-sama dengan detektor posisi rotor dan inverter berlaku penggantian untuk konventional motor de. Kami mencatat bahwa tachogenerator tidak diperlukan untuk kontrol kecepatan loop tertutup karena sinyal umpan balik kecepatan dapat

diturunkan dari frekuensi sinyal posisi rotor. Operasi empat kuadran penuh digunakan selama inverter dicatu dari converter yang sepenuhnya dikontrol.

Dalam istilah biaya sederhana, sistem self-sinkronisasi terlihat menarik ketika gabungan biaya dari inverter dan motor sinkron lebih rendah dari pada yang setara motor dc. Ketika skema semacam itu pertama kali diperkenalkan (pada 1970-an) mereka hanya efektif -biaya dalam ukuran yang sangat besar (katakanlah lebih dari 1 MW). Mereka dapat menggunakan thyristor kelas-konverter (relatif murah) dijembatan inverter karena thyristor akan berubah secara alami dengan bantuan motor yang dihasilkan e.m.f. Namun, pada kecepatan yang sangat rendah, e.m.f yang dihasilkan tidak cukup, sehingga motor dimulai dibawah operasi loop terbuka.

Karena biaya inverter telah turun, kemudi daya yang lebih rendah menggunakan motor magnet permanen menarik perhatian, terutama dimana kecepatan yang sangat tinggi diperlukan dan brushed motor de konvensional tidak cocok karena keterbatasan komutator.

BRUSHLESS DC MOTOR

Banyak penelitian untuk pengembangan brushless dc motor yang berasal dari industry peripheral computer dan kedirgantaraan, dimana kinerja tinggi ditambah dengan keandalan dan pemeliharaan yang rendah sangat penting. Sangat banyak brushless dc motor sekarang digunakan, terutama dalam ukuran hingga beberapa ratus watt. Versi kecil (kurang dari 100 w) semakin dibuat dengan seuma rangkaian kontrol dan daya elektrnik yang terintegrasi di salah satu ujung motor, sehingga dapat langsung dipasang sebagai pengganti motor dc. Karena semua rangkaian disipasi pemanas berada distator, pendinginan jauh lebih baik dari pada di motor konvensional, sehingga spesifikasi yang lebih tinggi dapat dicapai. Inersia rotor bisa kurang dari armature konvensional yang berarti bahwa rasio torsi-inersia lebih baik, memberikan akselerasi lebih tinggi. Kecepatan tinggi dapat dilakukan karena tidak ada komutator mekanik.

Pada prinsipnya tidak ada perbedaan antara brushless motor dc dan motor permanen magnet self-sinkronisasi yang dibahas sebelumnya dalam bab ini. Pembaca mengkin bingung mengapa beberapa motor digambarkan sebagai brushless dc sementara yang lain tidak. Faktanya, tidak ada alasan logis sama sekali, juga tidak ada definisi universal atau terminology yang disepakati.

Secara umum, praktik yang diterima adalah membatasi istilah 'brushless dc motor' ke jenis tertentu dari motor permanen magnet self-sinkron dimana magnet rotor dan belitan stator diatur untuk menghasilkan gelombang kerapatan fluks celah udara yang memiliki bentuk trapesium. Motor tersebut diumpankan dari inverter yang menghasilkan bentuk gelombang arus persegi Panjang, saklear dihidupkan oleh sinyal digital dari sensor posisi rotor yang relatif sederhana. Kombinasi ini memungkinkan motor untuk mengembangkan torsi yang lebih atau kurang, terlepas dari kecepatan, tetapi tidak memerlukan sensor posisi yang rumit. (sebaliknya, banyak mesin sinkron yang memiliki bidang air-gap sinusoidal, dan karenanya memerlukan penginderaan posisi yang lebih canggih dan profiling saat ini jika mereka ingin mengembangkan torsi kontinu).

Brusless de motor pada dasarnya komutasi elektronik motor de dan karena itu dapat dikontrol dengan cara yang sama seperti motor de. Banyak motor brushless digunakan dalam aplikasi type servo, dimana merka perlu diintegrasikan denga sistem yang dikontrol secara digital. Untuk aplikasi semacam ini, tersedia sistem kontrol digital lengkap, yang menyediakan torsi, kecepatan, dan kontrol posisi.

RELUKTANSI PENYAKLARAN KENDALI MOTOR

Kemudi reluktansi yang diaktifkan dikembangkan pada 1980-an untuk menawarkan keuntungan dalam al efisiensi, daya persatuan berat dan volume, ketahanan dan fleksibilitas operasional. Motor dan penggerak elektronika daya yang terkait harus dirancang sebagai paket integrase dan dioptimalkan untuk spesifikasi tertentu. Untuk efisiensi keseluruhan maksimum dengan beban tertentu atau rentang kecepatan maksimum. Meskipun relatif baru, eknologi ii telah diterapkan pada berbagai aplikasi termasuk kemudi industry untuk keperluan umum, kompresor, peralatan rumah tangga dan kantor dan peralatan bisnis.



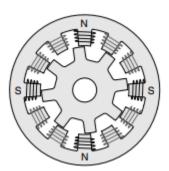
Plat 3.1 pensaklaran reluktansi motor. Motor dengan lubang bersirip adlah TEFV untuk digunakan dalam kemudi kecepatan pada industry yang dikendalikan untuk keperluan umum, yang terbesar diberi nilai 75 kW (100 jam) pada 1500 putaran/menit. Motor dengan ventilasi yang kuat (belakang tengah)digunakan untuk aplikasi berkinerja tinggi. Sebagian besar motor lainya dirancang untuk aplikasi OEM tertentu (kiri depan), otomotif (depan tengah), pengolahan makanan dan peneyedot debu (kanan depan). Kecepatan yang sangat tinggi dapat digunakan karena rotor sangat kuat dan tidak ada sikat, dan dengan demikian keluaran spesifik yang sangat tinggi diperoleh; beberapa motor kecil berjalan hingga 30000 putaran/menit. (foto oleh courtesy of switched reluctance kemudis Ltd).

Prinsip operasi

Reluktansi pensakelaran motor berbeda dari reluktansi motor konvensional karena rotor dan stator memiliki kutub yang menonjol. Pengaturan gand yang menonjol ini (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9) terbukti sangat efektif sejauh konversi energi elektromagnetik.

Stator membawa gulungan (coil) pada setiap kutub, sedangkan rotor tidak memiliki belitan atau magnet karenanya murah untuk diproduksi dan sangat kuat. Contoh khusus yang ditunjukkan pada Gambar 3.9 memiliki 12 kutub stator dan 8 kutub rotor, dan digunakan mewakili pengturan yang banyak, tetapi kombinasi kutub lainya digunakan untuk menyesuaikan aplikasi yang berbeda. Pada Gambar 3.9 12 kumparan dikelompokan untuk membentuk tiga fasa yang diberi energi secara independent dari converter 3 fasa.

Motor berputar dengan menarik fasa secara berurutan dalam urutan A,B,C untuk rotasi berlawanan arah jarum jam atau A, C, B untuk rotasi sejarah jarum jam, pasangan kutub rotor 'terdekat' ditarik sejajar dengan kutub stator yang sesuai dengan aksi reluktansi torsi. Pada Gambar 10.9 empat kumparan yang membentuk fasa A ditunjukkan oleh garis tebal, polaritas dari kumparan MMF ditunjukkan oleh huruf N dan S dibelakang inti. Setiap kali fasa baru, posisi kesetimbangan rotor naik sebesar 158 jadi setelah stu siklus lengkap (yaitu masing-masing dari tiga fasa) sudut yang diputar adalah 458. Karenanya mesin berputar sekali untuk delapan siklus fundamental catu ke belitan stator, jadi dalam hal hubungan antara frekuensi catu dasar dan kecepatan putaran, mesin pada Gambar 3.9 berperilaku sebagai mesin konvensional 16 tiang.



Gambar 3.9 Tipe switched reluctance (SR) motor. Masing-masing kutub 12-stator membawa belitan, sedangkan rotor 8-tiang tidak memiliki belitan atau magnet

Pembaca yang akrab dengan step motor (lihat Bab 1) akan dengan benar mengidentifiksi motor SR sebagai reluktansi variabel step motor. Tentu saja ada perbedaan desain penting yang mencerminkan berbagai tujuan (rotasi terus menerus untuk SR, perkembangan bertahap untuk steppert) tetapi sebaliknya mekanisme produksi torsi identic. Namun, sementara stepper dirancang terlebih dahulu dan terutama untuk operasi loop terbuka, motor SR dirancang untuk operasi selfsinkron, fasa sedang diaktifkan oleh sinyal yang berasal dari detektor posisi rotor yang dipasang

di poros (RPT). Dalam hal kinerja pada semua kecepatan dibawah kecepatan dasar, operasi terusmenerus pada torsi penuh. Diatas kecepatan dasar, fluks tidak lagi dapat dipertahankan pada amplitude penuh dan torsi yang tersedia berkurang dengan kecepatan. Karenaya karakteristik operasi sangat mirip dengan kemudi kecepatan terkontrol paling penting lainnay, tetapi dengan keuntungan tambahan bahwa efisiensi keseluruhan umumnya satu atau dua persen lebih tinggi.

Mengingat bahwa mekanisme produksi torsi pada reluktansi motor yang diaktifkan tampaknya sangat berbeda dari yang ada di motor dc, motor induksi dan motor sinkron (yang semuanya mengeksploitasi gaya 'BII'pada konduktor dalam medan magnet) mungkin diharapkan bahwa satu tipe lain akan menawarkan keuntungan yang jelas sehingga yang lain akan memudar.

Prediksi dan kontrol torsi

Jika besi dalam rangkaian magnetic diperlukan ideal, ekpresi analitis dapat diturunkan untuk mengeksplorasi reluktansi torsi motor dalam hal posisi rotor dan arus dalam belitan. Namun dalam praktiknya, analisis ini tidak banyak digunakan, tidak hanya karena reluktasi motor yang diaktifkan dirancang untuk beroperasi dengan tingkat saturasi magnetic yang tinggi dibagian-bagian sirkuit magnetic, tetapi juga karena pada kecepatan rendah tidak mungkin untuk dilakukan.

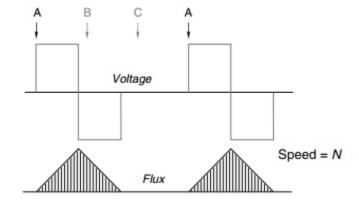
Fakta bahwa tingginya tingkat kejenuhan yang terlibat membuat prediksi torsi pada tahap desain menjadi sulit, tetapi meskipun hubungan yang sangat non linier dimungkinkan untuk menghitung fluks, arus dan torsi sebagai fungsi posisi rotor, sehingga kontrol strategi yang optimal dapat dirancang untuk memenuhi spesifikasi kinerja tertentu. Sayangnya kompleksitas ini berarti bahwa tidak ada rangkaian ekivalen sederhana yang tersedia.

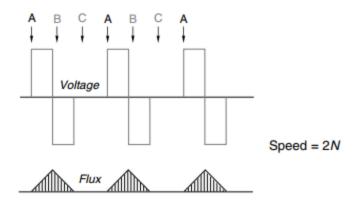
Seperti yang kita lihat ketika kita membahas motor penggerak, untuk memaksimalkan torsi rata-rata, pada prinsipnya diinginkan untuk menetapkan arus penuh pada setiap fasa secara instan, dan untuk menghapusnya secara instan setiap periode torsi positif. Tetapi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.14, ini tidak mungkin bahkan dengan motor stepping kecil. Untuk sebagian besar hal terbaik yang dapat dilakukan adalah menerapkan tegangan penuh yang tersedia dari konvertr pada awal periode 'on' dan (menggunakan sirkuit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.15) berikan tegangan negative penuh pada ujung pulsa dengan membuka kedua sakelar.

Operasi menggunakan tegangan positif penuh diawal dan tegangan negative penuh pada akhir periode 'on' disebut sebagai operasi 'pulsa tunggal'. Untuk semua kecuali motor kecil (kurang dari 1kW) resistensi fasa diabaikan dan akibatnya besarnya hubungan fluks fasa yang ditentukan oleh tegangan dan frekuensi yang diterapkan, seperti yang telah kita lihat berkali-kali sebelumnya dengan jenis motor lain.

Hubungan antara hubungan -fluks (ψ) dan tegangan diwujudkan dalam hokum faraday yaitu v= d ψdt, sehingga dengan bentuk gelombang tergangan persegi dari operasi pulsa tunggal, bentuk gelombang hubungan fluks memiliki bentuk segitiga yang sangat sederhana, seperti pada Gambar 3.10 yang menunjukkan bentuk gelombang untuk fasa A dari motor 3 fasa. (bentuk gelombang untuk fasa B dan C identic, tetapi tidak ditunjukkan: merke dipindahkan oleh sepertiga dan dua pertiga dari siklus, seperti yang ditunjukkan oleh tanda panah). Bagian atas diagram menggambarkan situasi pada kecepatan N, sementara bagia bawah sesuai dengan kecepatan 2N. seperti dapat dilihat pada kecepatan yang lebih tinggi (frekuensi tinggi) periode 'on' menjadi separuh, sehingga amplitude dari fluks berkurang yang mengarah ke perurangan torsi yang tersedia. Keterbatasn yang sama terlihat dalam kasus kemudi motor induksi inverterfed satusatunya perbedaan adalah bahwa bentuk gelombang dalam kasus itu adalah lebih sinusoidal dari pada segitiga.

Penting untuk dicatat bahwa bentuk gelombang fluks ini tidak tergantung pada posisi rotor, tetapi bentuk gelombang arus yang sesuai melakukanya karena MMF yang diperlukan untuk fluks yang diberikan tergantung pada reluktansi untuk fluks yang diberikan tergantung pada reluktansi efektif dari rangkaian magnetic, dan ini tentu saja bervariasi dengan posisi rotor.





Gambar 3.10 Bentuk gelombang tegangan dan fluks untuk reluktansi motor sakelar dalam mode 'pulsa tunggal'

Untuk mendapatkan torsi motor paling banyak untuk setiap gelombang fluks fasa tertentu, jelaslah bahwa naik turnnya fluks harus disesuaikan dengan posisi rotor: idealnya, fluks hanya boleh ada ketika menghasilkan torsi positif, dan nol setiap kali akan menghasilkan torsi negative, tetapi mengingat keterlambatan penumpukan fluks, mungkin lebih baik untuk menghidupkan lebih awal sehingga fluks mencapai tingkat yang layak pada titik ketika dapat menghasilkan torsi paling banyak, bahkan jika ini menghasilkan menyebabkan beberapa torsi negative pada awal dan akhir siklus.

Tugas sistem kontrol torsi adalah untuk menghidupkan dan mamatikan setiap fasa pada posisi rotor optimal dalam kaitanya dengan torsi yang diminta pada saat itu, dan ini dilakukan dengan mecak posisi rotor menggunakan RPT. Hanya sudut mana yang merupakan optimal tergantung pada apa yang harus dioptimalkan (misalnya torsi rata-rata, efisiensi keseluruhan), dan ini pada giliranya ditentukan dengan mengacu pada data yang disimpan secara digital dalam 'peta memori' pengontrolan yang menghubungkan arus, fluks, posisi rotor dan torsi untuk mesin tertentu. Dengan demikian kontrol torsi jauh lebih mudah dari pada kemudi dc, dimana torsi berbanding lurus dengan arus di jangkar, atau kemudi motor induksi dimana torsi sebanding dengan slip.

Keseluruhan Converter daya dn karakteristik kemudi

Perbedaan penting antara motor SR dan semua motor sinkron lainnya adalah kemampuan motor torsi penuhny dapat dicapai tanpa harus menyediakan dalam fasa arus positif dan negative.

Ini karena torsi tidak bergantung pada arah arus pada belitan fasa. Keuntungan dari kemudi 'unipolar' tersebut adalah karena masing-masing perangkat pensaklaran utama terhubung secara seri dengan salah satu gulungan motor (seperti pada Gambar 1.15), tidak ada kemungkinan kesalahan 'shoot-through' yang merupakan masalah utama pada inverter konvensional.

Kontrol kecepatan loop terttutup keseluruhan diperoleh dengan cara konvensional dengan kesalahan kecepatan bertindak sebagai permintaan torsi ke sistem kontrol torsi yang dijelaskan diatas. Namun dalam kebanyakan kasus, tidak perlu mencocokan tacho karena sinyal umpan balik kecepatan dapat diturunkan dari RPT. Secara umum dengan kemudi self-sinkron lainnya, tersedia berbagai karakteristik pengoperasian. Jika input converter sepenuhnya dikontrol, regenerasi dan operasi empat kuadran dimungkinkan kontinu dan torsi konstan, daya konstan, dan karakteristik tipe seri dianggap sebagai standar. Torsi kecepatan rendah bisa tidak merata kecuali jika diambil langkah-langkah khusus untuk profil pulsa saat ini, tetapi operasi kecepatan rendah terus menerus biasanya lebih baik dari pada kebanyakan sistem yang bersaing keseluruhan dalam hal efisiensi.

Review Pertanyaan

- 1. Berapa kutub ysng diperluksn untuk motor sinkron untuk berjlan pada kecepatan 300 putaran/menit dari catu 60Hz?
- 2. Tegangan apa yang harus digunakan untuk memungkinkan motor sinkon 4-kutub 420 v, 60 Hz digunakan pada catu 50 Hz?
- 3. Apa tujun yang dapat dipakai oleh sepasang mesin sinkron 3-fasa (satu diantaranya memiliki 10 proyeksi kutub pada rotornya dan 12 lainnya) dipasang pada pelat pada porosnya digabungkan Bersama-sama, tetapi tanpa proyeksi poros diujung luarnya?
- 4. Dalam bab ini diklaim bahwa kecepatan motor sinkron yang dicatu pada frekuensi konstan benar-benar konstan, terlepas dari beban: ia juga membicarakan tentang rotor yang jatuh kembali sehubungan dengan bidang yang berputar ketika beban pada poros bertambah. Karena medan berputar pada kecepatan konstan, bagaimana rotor dapat mundul kecuali kecepatanya kurang dari medan?
- 5. Buku ini menjelaskan bahwa dalam messin excited-rotor sinkron lilitan medan disertakan dengan arus dc melalui sliprings. Mengingat bahwa bidang berliku berputar, mengapa tidak ada penyebutan e.m.f di sirkuit rotor?

- 6. Motor sinkron yang besar berjalan tanpa ada beban pada porosnya, dan ditemukan bahwa ketika eksitasi dc pada rotor diatur kemaksimum atau minimum, arus ac di stator besar, tetapi pada tingkat menengah arus stator besar, tetapi pada tingkat menegah arus stator menjadi hamper nol. Power stator tampaknya tetap rendah terlepas dari arus stator. Jelaskan pengamatan ini dengan mengacu pada rangkaian ekuivalen dan diagram fasor. Dalam kondisi apa motor terlihat seperti kapasitor bila dilihat dari sisi catu?
- 7. Efek apa yang akan menggandakan total inersia efektif pada (a) waktu run-up dan (b) torsi pull-out dari mains-fed motor sinkron?
- 8. Motor sinkron besar sedang berjalan dengan sudut beban 40°. Jika eksitasi rotor disesuaikan sehingga induksi e.m.f meningkat sebesar 50%, memperkirakan sudut beban baru. Bagaimana daya input diharapkan berubah ketika eksitasi ditingkatkan?
- 9. Pada motor sinkron medan magnet dirotor stabil (terlepas dari periode ketika beban atau eksitasi berubah), sehingga tidak aka ada bahaya arus eddy. Apakah ini berarti bahwa rotor dapat dibuat dari baja padat, dan buka dari tumpukan laminasi berinsulasi?
- 10. Mengapa sebagian besar motor sinkron memiliki tiga fasa stator, daripada mengatakan empat atau lima?
- 11. Apa perbedaan utama antara brushless motor dc dan motor sinkron?
- 12. Mengapa sirkuit penggerak untuk saklar reluktansi motor disebut sebagai'unipolar', dan apa keuntungan yang dimiliki sirkuit unipolar dibandingkan dengan bipolar yang lebih umum?
- 13. Apa tujuan dari resistor 'dump' substansial yang ditemukan dikonverter kemudi dari banyak versi kemudi berdaya rendah yang dijelaskan dalam bab ini? Apa yang ditunjukkan oleh keberadaan dump resistor tentang kemampuan kemudi untuk beroperasi terus menerus luar kuadaran 1 dari torsi-kecepatan?
- 14. Manakah dari tipe kemudi yang dibahas dalam bab ini yang secara teoritis mampu beroperasi dalam menghasilkan mode? Factor-faktor apa yang menentukan apakah generasi dimungkinkan dalam praktik?