

MOTOR STEPPER: TEKNOLOGI, METODA DAN RANGKAIAN KONTROL

SYAHRUL

Jurusan Teknik Komputer
Universitas Komputer Indonesia

Motor stepper merupakan salah satu jenis motor yang banyak digunakan saat ini sebagai actuator, misalnya sebagai penggerak head baca/tulis pada disk drive yang akan menetapkan posisi head baca/tulis di atas permukaan piringan disket, penggerak head pada printer dan line feed control, dan yang lebih populer saat ini adalah aplikasi dalam bidang robotik. Dengan bantuan mikroprosesor atau mikrokontroler perputaran motor dapat dikontrol dengan tepat dan terprogram.

Motor stepper, actuator, kontrol.

Pendahuluan

Sebenarnya yang membedakan motor stepper dengan jenis motor lainnya misalnya pada motor AC dan motor DC salah satunya adalah dari segi putarannya. Motor stepper merupakan motor DC yang tidak mempunyai komutator. Umumnya motor stepper hanya mempunyai kumparan pada bagian *stator* sedangkan pada bagian *rotor* merupakan *magnet* permanen (bahan *ferromagnetic*). Karena konstruksi inilah maka motor stepper dapat diatur posisinya pada posisi tertentu dan/atau berputar ke arah yang diinginkan, apakah searah jarum jam atau sebaliknya. Ada tiga jenis motor stepper: **motor stepper Magnet Permanen**, **Variable Reluctance** dan **Hybrid**. Semua jenis tersebut melakukan fungsi dasar yang sama, tetapi mempunyai perbedaan penting pada beberapa aplikasi.

Motor stepper dapat berputar atau berotasi dengan sudut *step* yang bisa bervariasi tergantung motor yang digunakan. Ukuran *step* (*step size*) dapat berada pada *range* 0,9° sampai 90°. Misalnya sudut *step* 7,5°; 15°; 30° dan seterusnya tergantung

aplikasi atau kebutuhan yang diinginkan. Posisi putarannya pun relatif eksak dan stabil. Dengan adanya variasi sudut *step* tersebut akan lebih memudahkan untuk melakukan pengontrolan serta pengontrolannya dapat langsung menggunakan sinyal digital tanpa perlu menggunakan rangkaian *closed-loop feedback* untuk memonitor posisinya. Dengan alasan inilah maka motor stepper banyak digunakan sebagai *actuator* yang menerapkan rangkaian digital sebagai pengontrol/*driver*, ataupun untuk *interfacing* ke piranti yang berbasis mikroprosesor/mikrokontroler.

Ada beberapa cara dalam mendesain motor untuk mendapatkan aksi *stepping* yang dikontrol secara digital. Salah satu cara adalah seperti yang diilustrasikan pada gambar 1. Konstruksi motor stepper ini menggunakan empat kumparan *stator* (bagian yang tetap/stasioner) yang merupakan empat pasang kutub (*pole*). Setiap kutub *stator* mempunyai *offset* sudut sebesar 45° satu sama lainnya yang saling

Alamat korespondensi pada Syahrul, Jurusan Teknik Komputer Universitas Komputer Indonesia, Jalan Dipati Ukur 114, Bandung 40132.

berdekatan. Arah lilitan/kumparan dibuat sedemikian sehingga memberikan energi (*energizing*) ke salah satu kumparan yang membangkitkan medan “Utara” pada kutub tersebut. Sebaliknya akan memberikan medan kutub “Selatan”. Kutub utara dan selatan yang dibangkitkan oleh kumparan 1 ditunjukkan pada gambar 1. Bagian motor yang berputar (disebut *rotor*) didesain dengan menggunakan tita pasang lengan dari bahan *ferromagnetic*, satu dengan lainnya yang saling berdekatan membentuk sudut 60°. (Bahan *ferromagnetic* merupakan bahan yang mudah tertarik ke medan *magnet*). Karena kutub *stator* berjarak 45°, hal ini membuat sudut antara *stator* dan *rotor* sebesar 15°.

Pada gambar 1 terlihat sumbu *rotor* dengan garis *flux* yang diperoleh dari kutub *stator* utara-selatan adalah dari kumparan 1. Terjadinya pergerakan *step* pada *rotor* dengan sudut 15° searah jarum jam karena adanya pemutusan energi (*deenergizing*) pada kumparan 1 dan pemberian energi (*energizing*) pada kumparan 2. Pasangan *rotor* yang dekat dengan kumparan 2 sekarang akan segaris dengan pasangan kutub *stator flux line* 2. *Stepping* 15° berikutnya diperoleh dari pemberian energi pada kumparan 3, kemudian kumparan 4, kumparan 1, kumparan 2 dan seterusnya tergantung jumlah *step* yang diinginkan. Kode digital yang diberikan pada kumparan *stator* untuk *step* 15° searah jarum jam dan 15° berlawanan arah jarum jam dapat dilihat

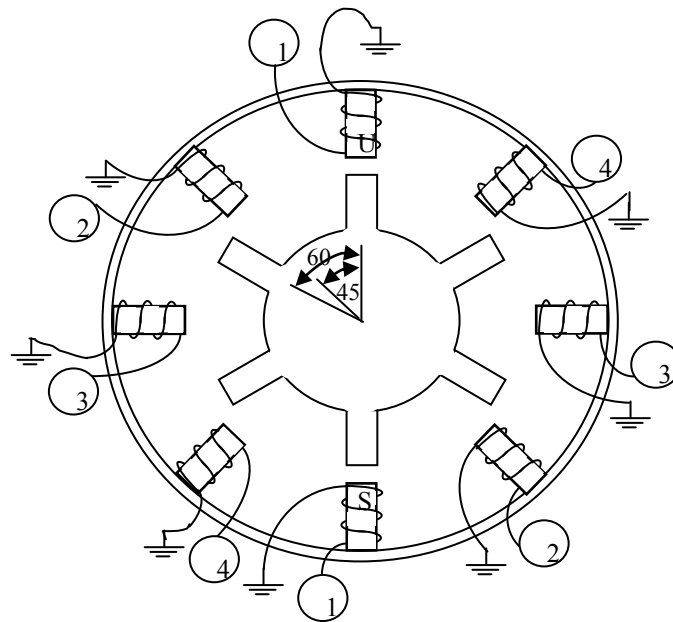
Pengaruh Pembebanan pada Motor Stepper

Operasi motor stepper dalam keadaan *open-loop* harus memberikan *step* (langkah putaran) sesuai dengan perintah atau kontrol yang diberikan pada motor stepper tersebut. Jika beban terlalu besar motor tak dapat bergerak normal atau diam sama sekali, hal ini disebabkan karena boleh jadi tidak cukup torsi (*torque*) untuk melakukan *stepping*. Dalam keadaan demikian, mungkin rotor dapat bergerak sedikit ketika mendapat *step pulse* (pulsa) tetapi kemudian jatuh kembali ke posisi semula. Keadaan ini disebut **stalling**. Jika tidak digunakan *feedback* (umpan balik), kontroler tidak dapat mengetahui apakah terjadi kegagalan *stepping*.

Dalam setiap *step*, penambahan torsi oleh motor stepper tergantung pada *shaft angle* (sudut poros). Faktanya bahwa torsi pada rotor sebenarnya nol bila tepat berada sejajar dengan kumparan yang sedang mendapat energi (*energized*). Pada gambar 2 diilustrasikan bagaimana motor yang hanya dapat memberikan torsi bila rotor tidak sejajar. Gambar 2(a) menunjukkan kutub rotor menuju ke suatu kutub medan yang sedang mendapatkan

KUMPARAN (searah jarum jam)	KUMPARAN (kebalikan arah jarum jam)
1 2 3 4	1 2 3 4
1 0 0 0	0 0 0 1
0 1 0 0	0 0 1 0
0 0 1 0	0 1 0 0
0 0 0 1	1 0 0 0
1 0 0 0	0 0 0 1
0 1 0 0	0 0 1 0
dst.	dst

Tabel 1
Kode digital step 15° searah dan berlawanan jarum jam



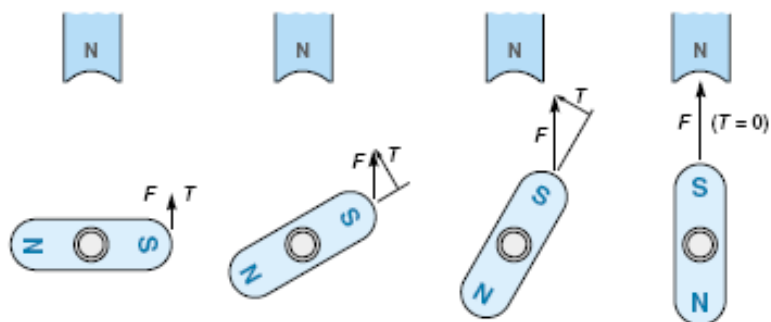
Gambar 1
Motor stepper empat-kumparan

energi. Gaya tarik terjadi antara ujung selatan (S) rotor dengan ujung utara (N) dari kutub medan (stator). Ketika kutub rotor mendekati kutub medan, gaya tarik (F) yang diterima lebih kuat tetapi komponen torsi (T) nya lemah. Bila rotor mengarah langsung ke kutub medan (gambar 2(b)), maka komponen torsi adalah nol. Secara praktis, hal ini berarti bahwa rotor dapat berhenti sebelum sejajar secara sempurna dengan kutub medan (yang mendapat energi). Pada contoh yang kita bahas ini, torsi

maksimum terjadi bila rotor berada sekitar 45° jauh dari kutub medan (gambar 2(b)). Jika beban melebihi torsi maksimum tersebut, maka rotor akan slip dengan cepat ke arah 90° ke belakang, dan hal ini dapat menyebabkan motor justru memberikan step terbalik/mundur.

Mode Operasi

Motor stepper mempunyai dua mode operasi yaitu **single step mode** dan **slew**



Gambar 1
Torsi beralih ke nol ketika rotor sejajar dengan kutub medan

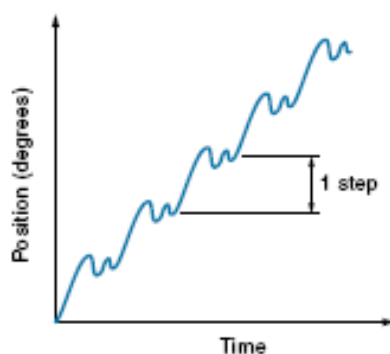
mode. Pada *single step mode* atau disebut juga *bidirectional mode*, frekuensi *step* cukup lambat untuk memperbolehkan rotor (hampir semua) berhenti di antara *step*. Gambar 3 menunjukkan sebuah grafik posisi versus waktu untuk operasi *single step*. Pada setiap *step*, motor meneruskan sudut tertentu dan kemudian berhenti. Jika motor bebannya kecil, *overshoot* (lonjakan) dan osilasi dapat terjadi pada akhir setiap *step* seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Keuntungan besar dari operasi *single-step* adalah bahwa setiap *step* benar-benar tidak tergantung pada *step* lainnya. Artinya motor dapat berhenti secara pasti (*dead stop*) atau bahkan berbalik arah kapan saja. Karena itu kontroler mempunyai kontrol yang instant dan sempurna pada operasi motor. Dan juga ada kepastian bahwa kontroler tidak akan kehilangan hasil cacahan (*count*, dan tentunya berarti posisi motor) sebab setiap *step* ditetapkan sedemikian baik. Kekurangan *single-step mode* adalah gerakannya lambat dan "**choppy**" (berombak). Kecepatan *single-step mode* yang tipikal adalah 5 *step*/detik yang mentranslasikan 12,5 rpm (*rotary per minute*) untuk motor 15°/*step*.

Pada ***slew mode***, atau *unidirectional mode*, frekuensi *step* adalah cukup tinggi sehingga tidak mempunyai waktu untuk

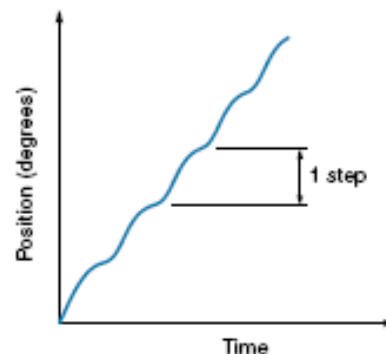
berhenti. Mode ini mirip dengan motor listrik biasa (*regular electric motor*). Jadi motor selalu mengalami torsi dan berotasi lebih halus dengan kontinyu. Gambar 4 menunjukkan grafik posisi versus waktu untuk *slew mode*. Walaupun setiap *step* dapat tetap dilihat, gerakannya jauh lebih halus dibandingkan dengan *single-step mode*.

Motor stepper dengan *slew mode* tidak dapat berhenti atau berbalik arah secara mendadak (*instantaneously*). Jika dicoba dilakukan, maka kemungkinan besar *rotational inertia* motor akan membawa rotor ke depan beberapa *step* sebelum berhenti. Jadi *step-count* keseluruhan akan hilang. Kemungkinan untuk menjaga *step-count* dalam *slew mode* dilakukan dengan memperlambat kecepatan lereng-atas dari *single-step mode* dan kemudian pada lereng-bawah bagian akhir dari *slew*. Hal ini berarti kontroler harus mengetahui waktu di depan seberapa jauh motor harus jalan. Secara tipikal *slew mode* digunakan untuk memperoleh posisi motor dalam "*ballpark*", dan kemudian *fine adjustment* dapat dilakukan dengan *single step*. *Slewing* menggerakkan motor lebih cepat tetapi memperbesar perubahan kehilangan *step-count*.



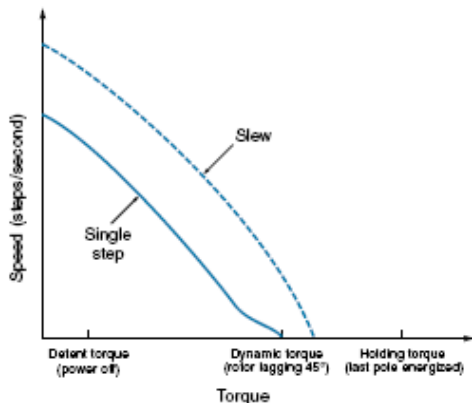
Gambar 3

Posisi versus waktu untuk *single-step mode*



Gambar 4

Grafik posisi versus waktu untuk *slew mode*



Gambar 5

Kurva *torque versus speed* untuk *single-step mode* dan *slew mode*

Gambar 5 menunjukkan kurva **torque versus speed** untuk *single-step mode* dan *slew mode*. Perhatikan sepanjang sumbu-x, ada tiga macam **torque** yaitu **detent torque**, **dynamic torque** dan **holding torque**. *Detent torque* adalah torsi yang diperlukan untuk mengatasi gaya magnet permanen (ketika power dimatikan). Gaya ini merupakan sentakan kecil yang anda rasakan bila anda memutar motor secara manual tanpa power. *Dynamic torque* merupakan *maximum running torque* yang diperoleh ketika rotor tertinggal di belakang kutub medan sebesar setengah *step*. *Holding torque* merupakan *stall torque* (torsi lambat) tertinggi dan dihasilkan ketika motor telah berhenti sempurna tetapi dengan kutub (*pole*) terakhir yang masih memperoleh *energized*. Sebenarnya ini merupakan jenis *detent torque* sebab memberikan sejumlah torsi eksternal yang dibutuhkan untuk memutar motor yang melawan kecenderungan (“*against its wishes*”)

Di sini kita dapat memberikan sebuah contoh kasus pada printer. Misalnya sebuah motor stepper mempunyai properti: *holding torque* 50 in.-oz, *dynamic torque* 30 in.-oz dan *detent torque* 5 in.-oz. Motor stepper akan digunakan untuk memutar diameter *platen* printer 1 in.

(gambar 6). Gaya yang dibutuhkan untuk menarik kertas melalui printer diperkirakan tidak melebihi 40 oz. Berat statik kertas pada platen (bila printer mati/off) adalah 12 oz. Pertanyaannya adalah apakah motor stepper pada printer tersebut bekerja?

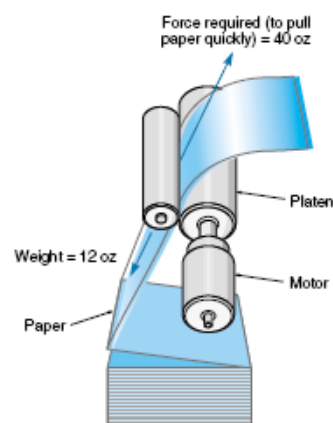
Untuk menjawab pertanyaan di atas, maka diperlukan torsi untuk memutar *platen* selama proses pencetakan, dan hal ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Torsi} = \text{gaya} \times \text{radius} = 40 \text{ oz} \times \left(\frac{1}{2} \times 1 \text{ in}\right) = 20 \text{ in.-oz}$$

Karena itu, motor dengan *dynamic torque* sebesar 30 in.-oz, akan cukup kuat untuk mengangkat kertas. Torsi pada *platen* dengan hanya berat kertas dapat dihitung sebagai berikut:

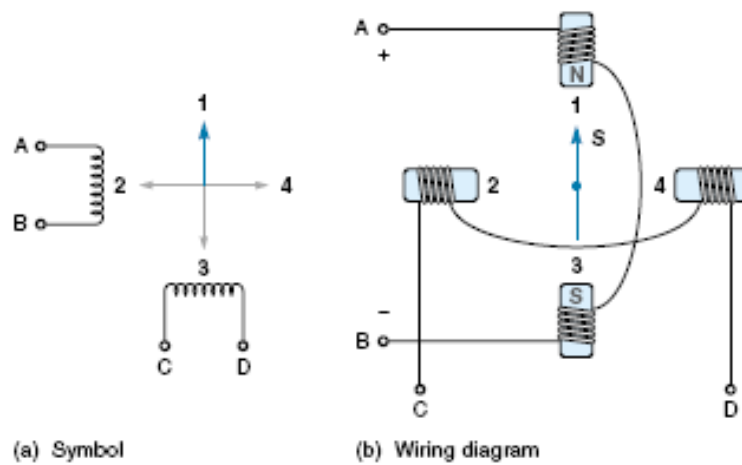
$$\text{Torsi} = \text{gaya} \times \text{radius} = 12 \text{ oz} \times \left(\frac{1}{2} \times 1 \text{ in}\right) = 6 \text{ in.-oz}$$

Ketika printer on, kekuatan *holding torque* 50 in.-oz lebih dari cukup untuk menahan kertas. Namun, bila printer dalam keadaan off, berat kertas melebihi *detent torque* 5 in.-oz, dan platen (dan motor) akan berputar terbalik. Karena itu kita simpulkan bahwa motor tidak dapat menerima beban tersebut.



Gambar 6

Motor stepper menggerakkan platen printer



Gambar 7
Motor stepper dua-phase (bipolar)

Motor Stepper Dua-Phase (Bipolar)

Motor stepper dua-phase (bipolar) mempunyai konstruksi yang mirip dengan jenis unipolar, hanya tidak terdapat *tap* pada kumparannya (gambar 7). Penggunaan motor stepper jenis bipolar memerlukan rangkain yang agak lebih rumit untuk mengatur agar motor ini dapat berputar dalam dua arah. Untuk menggerakkan motor stepper jenis ini biasanya diperlukan sebuah *driver* motor yang dikenal dengan nama *H bridge*. Rangkaian ini akan mengontrol setiap kumparan secara terpisah (*independent*) termasuk polaritas untuk setiap kumparan.

Motor stepper dua-phase (bipolar) hanya mempunyai dua rangkaian tetapi sebenarnya terdiri dari empat kutub medan. Gambar 7(a) menunjukkan simbol motor dan gambar 7(b) menunjukkan bagaimana perkawatan/lilitan internal motor tersebut. Pada gambar 7(b), rangkaian AB terdiri dari dua kutub berlawanan sedemikian bila tegangan yang dikenakan (+A-B), kutub bagian atas akan memberikan ujung utara terhadap rotor dan kutub bawah akan memberikan

ujung selatan. Rotor akan cenderung sejajar sendiri secara vertikal (posisi 1) dengan kutub selatannya mengarah ke atas (sebab kutub magnet yang berlawanan akan saling menarik).

Cara yang paling sederhana dalam memberikan *step* pada motor ini adalah dengan memberikan energi secara bergantian pada AB atau CD untuk menarik rotor dari kutub ke kutub. Jika rotor bergerak CCW (*counterclockwise*, berlawanan arah jarum jam) dari posisi 1, maka rangkaian CD harus diberi energi dengan polaritas C+D-. Hal ini akan menarik rotor ke posisi 2. Selanjutnya, rangkaian AB diberi energi lagi, tetapi kali ini polaritasnya terbalik (-A+B), yang menyebabkan kutub bawah memberikan ujung utara pada rotor, dengan demikian ujung utara pada rotor, dengan demikian tertarik ke posisi 3. Istilah bipolar digunakan pada motor ini karena arus kadang-kadang terbalik. Urutan tegangan diperlukan untuk memutar motor satu putaran penuh dan ditunjukkan di bawah ini. Pembacaan dari atas ke bawah memberikan urutan untuk peralihan/perputaran CCW, pembacaan dari bawah ke atas adalah urutan CW (*clockwise*, sarah jarum jam):

Rangkaian	Posisi
A+ B-	1
C+ D-	2
A- B+	3
C- D+	4

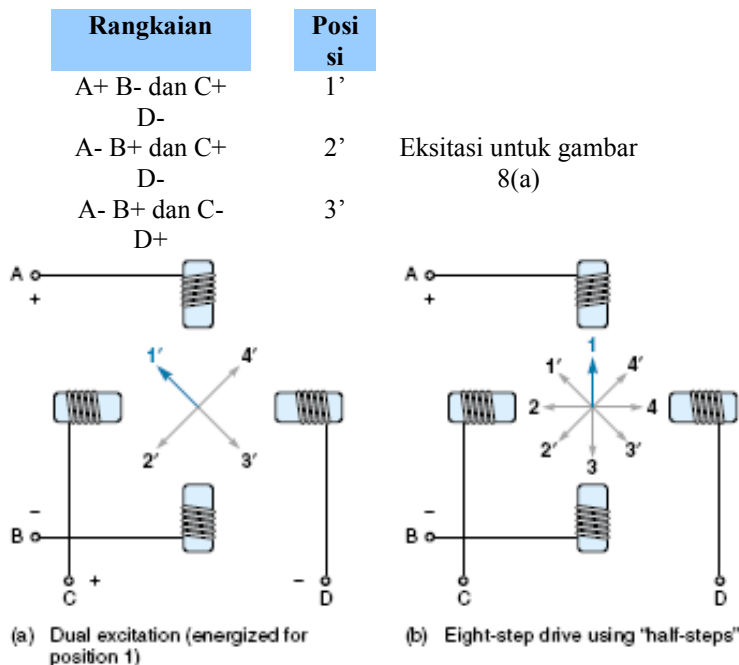
Eksitasi untuk gambar 7

Cara lain pengoperasian stepper dua-phase adalah memberikan energi pada kedua rangkaian tersebut dengan waktu yang sama. Pada mode ini, rotor akan ditarik kepada dua kutub yang berdekatan dan mengangap posisinya ada di antaranya. Gambar 8(a) menunjukkan empat posisi rotor yang mungkin. Urutan eksitasi untuk *stepping* pada *dual mode* ini adalah sebagaimana terlihat pada Gambar 9.

Ada dua rangkaian pada waktu yang sama menghasilkan torsi lebih (yang diinginkan) daripada mode eksitasi tunggal; namun, arus yang digunakan juga lebih besar dan kontrolernya lebih kompleks. Dan karena menghasilkan *power-to-weight ratio* yang besar maka pada biploar ini mode eksitasi ganda (*dual-excitation mode*)

menghasilkan *power-to-weight ratio* yang besar maka pada biploar ini mode eksitasi ganda (*dual-excitation mode*) merupakan hal yang sangat lazim .

Kedua metoda tersebut menghasilkan **four-step drive**, yakni empat *step* per siklus. Dengan memperlirakan atau mengubah-ubah (*alternating*) mode eksitasi tunggal (*single-excitation mode*) dan mode eksitasi ganda (*dual-excitation mode*), maka motor dapat diarahkan untuk mendapatkan **half-step**, seperti yang ditunjukkan pada gambar 8(b). Posisi 1, 2, 3 dan 4 berasal dari mode eksitasi tunggal, dan posisi 1', 2', 3' dan 4' dari mode eksitasi ganda. Bila pengemudian ini yang digunakan, maka motor memperoleh delapan *step* per revolusi (satu putaran lengkap 360°) dan disebut **eight-step drive**. Hal ini dibutuhkan pada beberapa aplikasi karena membolehkan motor mempunyai revolusi posisi dua kali. Bahkan memungkinkan *step* lebih kecil dengan sebuah proses yang disebut *microstepping*.



Gambar 8
Mode operasi tambahan pada motor stepper.

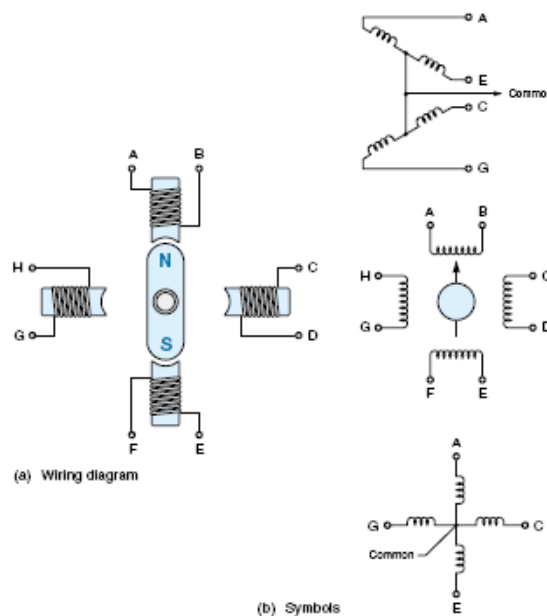
Motor Stepper Empat-Phase (Unipolar)

Motor stepper empat-phase (unipolar) adalah jenis motor stepper yang paling umum (gambar 9). Istilah empat-phase digunakan karena motor mempunyai empat kumparan medan yang dapat diberikan energi secara terpisah/ tersendiri, dan istilah unipolar digunakan karena arus selalu menjalar dalam arah yang sama melalui kumparan. Cara sederhana untuk mengoperasikan motor stepper empat-phase adalah dengan memberikan energi phase satu pada suatu waktu yang berurutan (dikenal dengan *wave drive*). Untuk memutar ke arah CW, digunakan urutan berikut: Dibandingkan dengan motor stepper

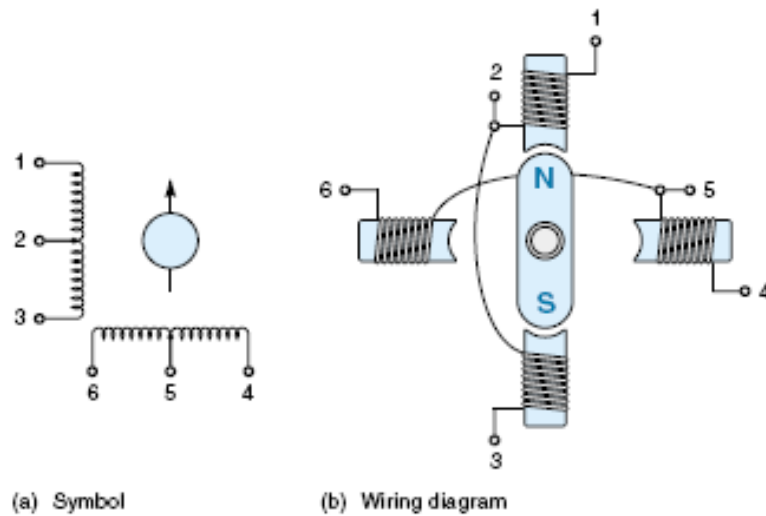
- A B
- C D Eksitasi untuk gambar 9
- E F
- G H

bipolar dua-phase, motor stepper empat-phase mempunyai keuntungan karena kesederhanaannya (*simplicity*). Rangkaian kontrol motor empat-phase mudah men-switch urutan kutub on dan off ; tanpa harus membalik polaritas kumparan medan (namun, motor dua-phase menghasilkan torsi lebih besar karena *pushing* dan *pulling* dilakukan bersamaan).

Torsi motor stepper empat-phase dapat dinaikkan jika dua kumparan yang berdekatan diberikan energi secara bersamaan, menyebabkan rotor menjajarkan sendiri antara kutub-kutub medan (seperti yang ditunjukkan pada gambar 10). Walaupun diperlukan masukan energi dua kali lipat, torsi motor meningkat sekitar 40%, dan kecepatan respon meningkat.



Gambar 9
Motor stepper empat-phase (unipolar)



Gambar 10

Motor stepper empat-phase dengan kumparan *center tap*

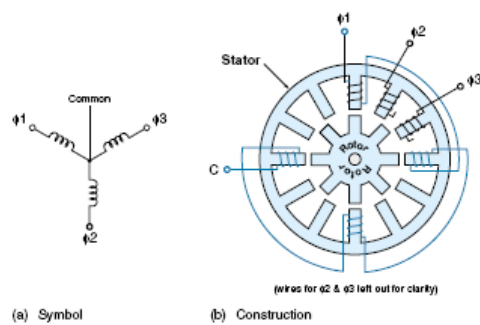
Dengan konstruksi motor demikian mereka dapat digunakan dalam mode dua-phase atau empat-phase seperti yang biasa digunakan. Hal ini dilakukan dengan membiarkan dua kumparan tambahan (dari motor dua-phase) yang secara internal dihubungkan ke titik di antara kumparan medan yang berlawanan. Gambar 10(a) menunjukkan simbol untuk jenis motor ini dan gambar 10(b) menunjukkan interior kumparan motor. Jika motor tersebut digunakan dalam mode dua-phase, maka *center tap* (terminal 2 dan 5) tidak digunakan. Jika dioperasikan dalam mode empat-phase, *center tap* menjadi *common return*, dan *power* diberikan pada terminal 1, 4, 3 dan 6 seperti yang dibutuhkan.

Saat ini hampir semua motor stepper magnet permanen tersedia dalam ukuran *step* yang lebih kecil dibandingkan dengan motor sederhana yang telah kita bahas di depan.

Motor Stepper Variable-Reluctance

Motor stepper *variable-reluctance* (VR) tidak menggunakan magnet pada

rotornya; sebagai gantinya, digunakan roda besi bergerigi (*toothed iron wheel*, [lihat gambar 11(b)]). Keuntungan dari tidak diperlukannya rotor yang termagnetisasi adalah bahwa dia dapat dibuat dalam berbagai ketajaman (*any shape*). Setiap gigi rotor ditarik mendekati kutub medan dalam stator yang mendapat energi, tetapi tidak dengan gaya yang sama seperti pada motor magnet permanen. Hal ini memberikan motor-VR

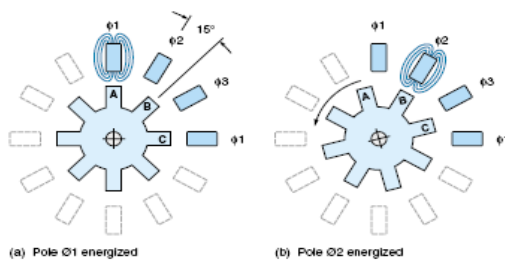


Gambar 10

Motor stepper tiga-phase (15 *step*)

torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan motor magnet permanen.

Motor stepper VR umumnya mempunyai tiga atau empat phase. Gambar 11(a) menunjukkan sebuah motor stepper **tiga-phase** tipikal. Stator mempunyai tiga rangkaian kutub medan: $\emptyset 1$, $\emptyset 2$ dan $\emptyset 3$. Gambar 11(b) menunjukkan bahwa motor aktual mempunyai 12 kutub medan, di mana setiap rangkaian memberikan energi pada empat kumparan; anda dapat melihat ini dengan mengamati lebih dekat kumparan $\emptyset 1$ dalam gambar 11(b). Perhatikan bahwa rotor hanya mempunyai



Gambar 12

Motor stepper VR tiga-phase 150.
(hanya empat kutub medan yang ditampilkan)

8 gigi walaupun terdapat 12 gigi pada stator. Karena itu gigi rotor tidak dapat naik **“one for one”** dengan gigi stator. Gambar 12 mengilustrasikan operasi motor stepper VR. Bila rangkaian $\emptyset 1$ mendapat energi, rotor bergerak ke posisi seperti yang ditunjukkan pada gambar 12 (a)—yakni gigi rotor (A) segaris dengan kutub medan $\emptyset 1$. Selanjutnya rangkaian $\emptyset 2$ mendapat energi. Gigi rotor B mendekati dan ditarik ke arah $\emptyset 2$ [gambar 12(b)]. Perhatikan bahwa rotor harus bergerak hanya 15° untuk persejajaran ini. Jika rangkaian $\emptyset 3$ yang berikutnya mendapat energi, rotor akan terus berlanjut ke arah CCW 15° dengan menarik gigi C menjadi sejajar.

Sudut *step* motor stepper VR adalah selisih antara sudut rotor dan sudut stator. Untuk motor pada gambar 12, sudut antara kutub medan adalah 30° , dan sudut antara kutub rotor adalah 45° .

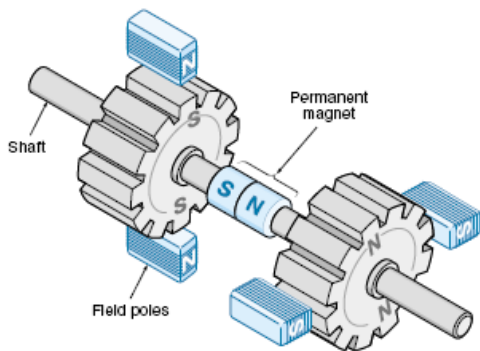
Karena itu *step* nya adalah 15° ($45^\circ - 30^\circ = 15^\circ$). Dengan menggunakan desain ini, motor stepper VR dapat dicapai *step* yang sangat kecil (kurang dari 1°). Ukuran *step* yang kecil sering menjadi pertimbangan karena untuk memberikan posisi yang lebih presisi.

Motor stepper VR mempunyai banyak perbedaan fungsional bila dibandingkan dengan motor stepper jenis magnet permanen. Karena rotor tidak termagnetisasi, motor VR lebih lemah (torsi kecil) dari motor stepper magnet permanen dengan ukuran yang sama. Dan juga, tidak mempunyai *detent torque* bila catu daya mati, yang dapat merupakan keuntungan atau kerugian tergantung pada aplikasi. Akhirnya, karena ukuran *step* nya kecil dan *detent torque* yang direduksi, motor stepper VR mempunyai kecenderungan yang lebih untuk mengalami *overshoot* dan melewati suatu *step*. Hal ini merupakan hal yang serius jika motor dioperasikan dalam *open-loop*, di mana posisi dipertahankan dengan menjaga sejumlah *step* yang diberikan. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa urutan *damping* dapat digunakan. Hal ini dapat dilakukan secara mekanik dengan menambahkan gesekan (*friction*) atau secara elektrik dengan memberikan suatu torsi pengereman kecil (*slight braking torque*) dengan kutub-kutub medan yang berdekatan.

Motor Stepper Hybrid

Motor stepper hybrid menggabungkan kelebihan/fitur motor stepper magnet permanen dan motor stepper *variable reluctance* (VR) dan ini yang paling banyak digunakan saat ini. Rotor bergerigi, yang membolehkan sudut *step* yang sangat kecil ($1,8^\circ$ tipikal), dan mempunyai suatu magnet permanen yang memberikan *detent torque* yang kecil bahkan ketika catu daya dimatikan.

Gambar 13 mengilustrasikan operasi



Gambar 13

Konstruksi internal motor stepper hybrid (hanya ditampilkan dua kutub per stator)

internal dari motor hybrid yang dapat dianggap lebih rumit dari motor magnet permanen biasa/ sederhana. Rotor terdiri dari dua roda bergigi dengan suatu magnet di antaranya—satu roda termagnetisasi secara sempurna menjadi utara dan yang lainnya sempurna menjadi selatan. Untuk setiap *step*, dua gigi berlawanan pada roda utara ditarik menuju dua kutub medan selatan, dan dua gigi berlawanan pada roda selatan ditarik menuju dua kutub medan utara. Kumparan atau perkawatan internal lebih rumit dari motor magnet permanen atau motor VR, tetapi untuk ke dunia luar motor ini sederhana dan mudah untuk dikontrol.

Teori operasi motor hybrid mirip dengan motor VR di mana rotor dan stator mempunyai jumlah gigi yang berbeda dan untuk setiap *step*, gigi yang mendapat energi terdekat yang akan ditarik untuk disejajarkan. Namun, prinsip-prinsip magnetik diperlukan, pada satu waktu kapan saja, setengah kutub-kutub menjadi utara dan setengah lainnya menjadi selatan. Untuk mempertahankan keseimbangan magnetik (*magnetic balance*), setiap kutub harus dapat men-switch polaritas supaya dapat memberikan kutub yang tepat pada waktu yang tepat. Hal ini diselesaikan dengan satu cara dari dua cara: Untuk motor bipolar, tegangan yang digunakan harus dibalik oleh rangkaian *driver* (seperti pada

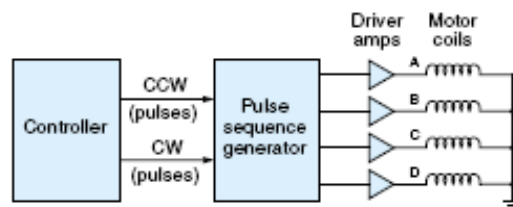
motor stepper magnet permanen dua-phase). Pada sisi lain, motor unipolar mempunyai dua kumparan terpisah arah berlawanan pada setiap kutub medan (disebut *bifilar winding*), dan juga setiap kutub dapat menjadi utara atau selatan. Karena itu motor stepper hybrid unipolar tidak memerlukan rangkaian pembalik polaritas.

Rangkaian Kontrol Motor Stepper

Untuk menghubungkan motor stepper dengan piranti digital atau *I/O port* dibutuhkan rangkaian *interface*. Hal ini sangat penting karena jumlah arus yang diperlukan untuk memberikan energi (*energizing*) pada pasangan-pasangan kumparan lebih besar dari kemampuan *I/O port*, sehingga dibutuhkan sejumlah rangkaian penyangga (*buffer*) yang akan menguatkan arus untuk dapat menggerakkan motor stepper.

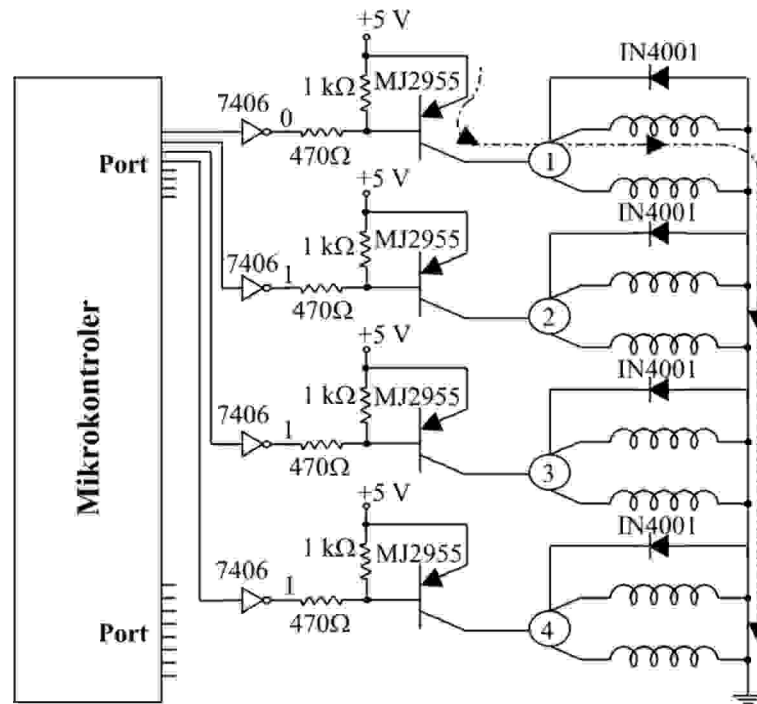
Rangkaian penggerak (driver) motor stepper

Kontroler yang menentukan jumlah dan arah *step* yang akan diberikan (tergantung aplikasi). *Driver amplifier* memperbesar daya dari sinyal kemudi kumparan. Di sini tidak diperlukan rangkaian pengubah digital ke analog karena kutub-kutub medan adalah on atau off, *driver amplifier* efisien kelas C dapat digunakan.



Gambar 14

Diagram blok rangkaian kontrol motor stepper



Gambar 15
Rangkaian kontrol motor stepper

Pengontrolan Motor Stepper Empat-Phase

Rangkaian kontrol motor stepper seperti ini dapat dilihat pada gambar 15. Keluaran rangkaian *inverting buffer* 7406 bagian atas adalah LOW, membias maju (*forward biasing*) basis-emiter dari transistor daya PNP MJ2955. Hal tersebut menyebabkan kolektor-emiter dalam keadaan *short*, yang menimbulkan arus yang realtif besar mengalir ke *ground* melalui kumparan nomor 1. Dioda 1N4001 memproteksi kumparan dari aliran balik yang besar ketika arus berhenti.

Kumparan pada motor stepper mempunyai karakteristik yang sama dengan karakteristik beban induktif lainnya. Oleh karena itu ketika terdapat arus yang melalui kumparan motor, tidak dapat dimatikan dengan seketika tanpa menghasilkan tegangan transien yang sangat tinggi.

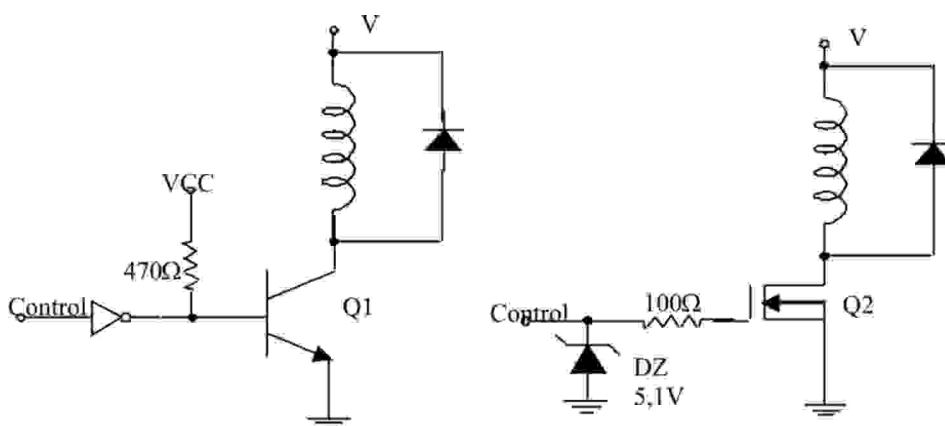
Kedadaan ini biasanya nampak dengan timbulnya percikan bunga api (ketika menggunakan motor dc dengan daya besar). Hal tersebut sangat tidak dikehendaki karena dapat merusak saklar sehingga perlu diberikan rangkain tambahan untuk membatasi tegangan transien yang muncul. Sebaliknya ketika saklar tertutup maka terdapat arus yang mengalir ke kumparan motor dan akan menghasilkan kenaikan tegangan secara perlahan. Untuk membatasi tegangan *spike* yang muncul maka ada dua alternatif pemecahannya yaitu pertama dengan memparalelkan dioda dengan kumparan motor dan alternatif kedua adalah dengan memparalelkan kapasitor dengan kumparan motor. Dioda yang terpasang paralel tersebut harus mampu melewatkan arus balik yang terjadi ketika saklar terbuka misalnya dioda 1N4001 atau 1N4002. Jika dioda yang digunakan mempunyai karkateristik

“fast switch” maka perlu diberikan penambahan kapasitor yang dipasang paralel dengan dioda tersebut. Dengan pemasangan kapasitor paralel dengan kumparan motor maka *spike* yang ditimbulkan akan menyebabkan kapasitor tersebut *charge* sehingga tegangan *spike* yang terjadi tidak akan keluar tetapi diredam oleh kapasitor ini. Tetapi yang paling penting adalah kapasitor ini harus mampu menahan *surge charge* pada saat terjadi *spike*. *Surge charge* adalah arus tiba-tiba yang sangat besar yang muncul bersamaan dengan tegangan *spike*. Nilai kapasitor harus dipilih pada kondisi di mana nilai induktansi dari kumparan motor stepper paling besar.

Jika rangkaian kontrol yang mengendalikan rangkaian *motor driver* ini berupa mikrokontroler atau komponen digital lainnya maka sebaiknya setiap *port* yang mengontrol rangkaian *driver* motor stepper ini diberikan *buffer* terlebih dahulu agar tidak membebani *port* mikrokontroler yang digunakan. Contoh rangkain *buffer* dapat dilihat pada gambar 16. Ada dua alternatif yaitu dengan menggunakan *buffer* terlebih dahulu atau menggunakan rangkaian FET yang mempunyai impedansi masukan yang sangat tinggi, sebagai komponen

saklarnya. Tegangan V_{motor} tidaklah harus selalu sama dengan tegangan V_{CC} mikrokontroler karena digunakannya *buffer* yang mempunyai keluaran *open collector* sehingga keluarannya dapat di-*pull-up* ke tegangan yang dikehendaki. Pemilihan transistor adalah yang mempunyai karakteristik I_C (arus kolektor) yang relatif besar sehingga dipilih transistor power yang mampu melewatkan arus sesuai dengan arus yang diperlukan oleh kumparan motor stepper yang digunakan. Jika arus yang ditarik oleh kumparan motor stepper ternyata lebih besar dari kemampuan transistor, maka transistor akan cepat panas dan dapat menyebabkan kerusakan pada transistor tersebut.

Dari gambar 16, resistor *pull-up* sebesar 470 akan memberikan arus sebesar 10mA ke basis transistor Q1. Jika Q1 mempunyai gain sebesar $b=1000$ maka arus kolektor yang dapat dilewatkan adalah $I_C = bI_B = 1000 \times 10mA = 10A$. Berarti arus maksimum yang dapat dilewatkan ke kumparan motor stepper akan sama dengan arus kolektor. Tetapi arus yang melalui kumparan harus lebih kecil dari arus maksimum I_C yang diperbolehkan. Untuk komponen FET dapat digunakan misalnya IRL540 yang dapat

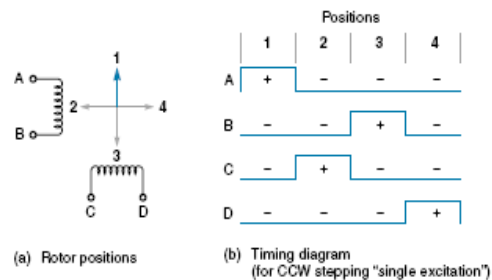


Gambar 16
Rangkain *driver* motor stepper empat kumparan

mengalirkan arus sampai 20A dan mampu menahan tegangan balik sampai 100V. Hal ini disebabkan karena FET ini mampu menyerap tegangan spike tanpa ada proteksi dioda. Tetapi komponen ini memerlukan heat sink yang besar yang mampu menyerap panas dengan baik. Sebaiknya digunakan kapasitor untuk menekan level tegangan spike yang ditimbulkan dari transisi saklar dari on ke off.

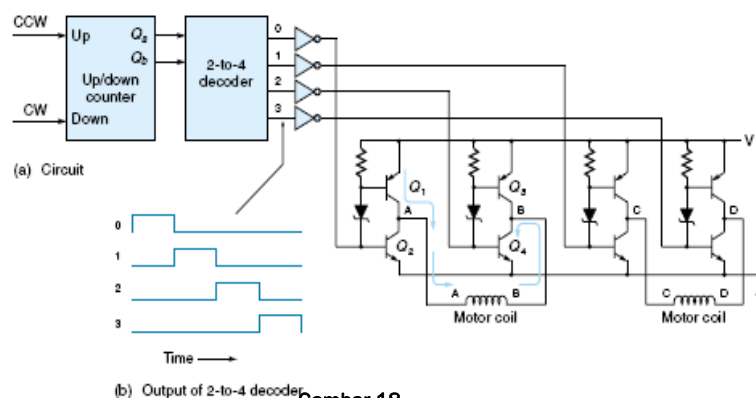
Pengontrolan Motor Stepper Dua-Phase

Pengontrolan motor stepper dua-phase (bipolar) memerlukan polaritas terbalik, sehingga membuat lebih rumit daripada pengontrol motor stepper empat-phase. Gambar 17 menunjukkan sebuah motor stepper dua-phase. Ada dua rangkaian yang disimbolkan dengan AB dan CD. Diagram pewaktuan (*timing diagram*) menunjukkan bentuk-gelombang (*waveform*) yang diperlukan untuk A, B, C dan D (rotasi CCW). Dengan melihat posisi kolom 1 ke bawah dalam gambar 17(b), kita melihat A adalah positif dan B negatif, sehingga arus akan mengalir dari A ke B dalam rangkaian AB. Sementara itu C dan D keduanya negatif, yang secara efektif mematikan rangkaian CD. Untuk posisi 2 pada *timing diagram*, C adalah positif, dan D negatif; yang menyebabkan arus mengalir dari C ke D dalam rangkaian CD sedangkan kumparan AB off/mati sempurna dan seterusnya untuk posisi 3 dan 4.



Gambar 17
Operasi motor stepper dua-phase (bipolar)

Rangkaian kontroler berbasis mikroprosesor/mikrokontroler atau berupa rangkaian digital seperti yang ditunjukkan pada gambar 18(a) dapat digunakan untuk membangkitkan bentuk-gelombang pewaktuan (*timing waveform*). Pencacah maju/mundur (*up/down counter*) 2-bit yang memecah setiap pulsa yang diterima pada masukan naik (*up input*) dan memecah turun untuk setiap pulsa yang diterima pada masukan turun (*down input*). Qa dan Qb dari pencacah maju/mundur didekodekan pada *decoder 2-ke-4*. Sebagai pencacah adalah selalu berada pada salah satu dari empat keadaan (00, 01, 10, 11), satu (dan hanya satu) dari keluaran decoder yang "high" pada satu waktu. Gambar 18(b) menunjukkan keluaran dekoder bila *counter* mencacah naik (hasil pulsa CCW dari kontroler).



Gambar 18
Rangkaian interface lengkap untuk motor stepper dua-phase (bipolar)

Pekerjaan/tugas selanjutnya adalah mengkoneksikan sinyal pewaktuan (*timing signal*) dari decoder dengan cara yang sama seperti men-drive kumparan-kumparan motor. Hal ini dapat diselesaikan dengan rangkaian penguat daya seperti yang tampak pada sebelah kanan dari gambar 18(a). Perhatikan ada empat *complementary-symmetry driver*, satu untuk setiap ujung dari setiap kumparan motor. Bila Q_1 dan Q_4 on, maka arus dapat mengalir melalui motor dalam arah yang ditunjukkan (kiri ke kanan). Pada sisi lain, bila Q_3 dan Q_2 on, maka polaritas dibalik, dan arus mengalir berlawanan arah melalui motor (kanan ke kiri). Akhirnya jika Q_1 dan Q_3 off, maka tidak ada arus yang mengalir pada kumparan motor.

Empat keluaran dari decoder (yang harus dibalik dalam kasus ini) mengontrol empat rangkaian transistor *complementary-symmetry*. Resistor dan dioda zener pada setiap rangkaian menyebabkan transistor atas menjadi on bila transistor bawah off, dan sebaliknya. Jajaki melalui rangkaian untuk setiap *step* dari decoder dan anda akan melihat bahwa timing diagram dari gambar 17(a) dihasilkan kembali. Susunan ini akan memberikan *step* CCW pada motor bila *counter* mencacah naik. Bila *counter* mencacah turun, maka urutannya akan terbalik dan motor akan *step* CW.

Daftar Pustaka

1. Kilian, (2003), *Modern Control Technology: Components and Systems*, Delmar.
 2. Kleitz, William, (1997), *Digital Microprocessor Fundamentals: Theory and Applications*, Prentice-Hall International.
- Maas, James, (1995), *Industrial Electronics*, Prentice-Hall International.
-

