

Bab I

Dasar Kontrol

I.1. Pendahuluan

Prinsip dasar dari kontrol (Control) adalah mengatur atau mengendalikan suatu sistem secara otomatis tanpa bantuan manusia secara langsung yaitu dengan menggantikan sistem manual dengan sistem otomatis. Konsep otomatis mula-mula muncul pada bidang industri yaitu sejak revolusi di Inggris di abad ke-18. Dalam era 200 tahun kemudian adalah sebagai berikut:

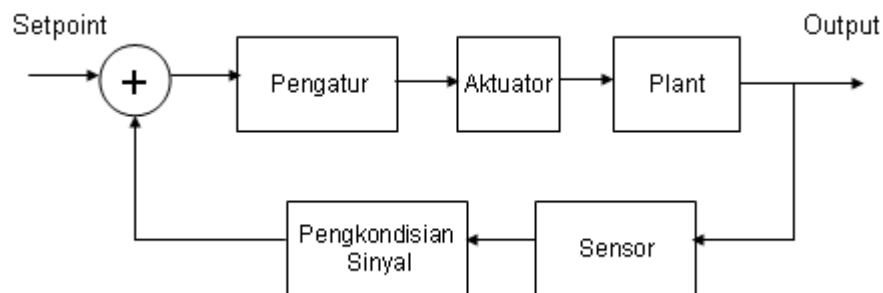
- Mekanisasi selama revolusi industri, 1770
- Henry Ford dalam pengembangan sistem otomatis ketat, 1900
- Mesin dengan kontrol otomatis seperti mesin fotokopi
- Mesin kalkulator, 1952
- Mikrochip computer, akhir 1960
- Mesin CNC (computer numerical controlled)
- Robot industri, 1970
- Jaringan computer, 1970
- Automasi penuh, Sistem manufaktur, 1990-an

Selain menggantikan fungsi manusia sistem kontrol otomatis memberikan kelebihan dalam meningkatkan akurasi, memperkuat kemampuan perulangan, mengurangi kegagalan sistem.

1.2. Terminologi Kontrol

Manusia mulai berpikir untuk merancang suatu mekanisme pengendali yang dapat menggantikan fungsi manusia dalam menentukan parameter pengendali, target pengendalian (set point), dan melakukan pengukuran terhadap variabel yang dikendalikan. Tentunya semua parameter dan variabel yang ada di dalam sistem kontrol harus dapat terukur dan dapat dihitung sehingga sistem yang diatur dapat memberikan kinerja yang diinginkan.

Sistem otomatis biasanya berupa sebuah lup tertutup yaitu berupa diagram kontrol yang menggambarkan proses dan aliran variabel. Bentuk sederhana dari diagram kontrol dapat dilihat pada Gambar 1.1. dibawah ini.



Gambar 1.1. Diagram Kontrol Automatis

Diagram kontrol otomatis ini memperlihatkan alur sinyal dimulai dari set point sebagai target kontrol yang ditentukan oleh operator atau data kontrol. Set point ini merupakan acuan bagi pengatur untuk secara otomatis memaksa agar output dari sistem yang dikontrol yaitu plant, sama atau mendekati nilai set point ini. Sistem kontrol dikatakan stabil jika nilai dari output mendekati set point ini atau berosilasi teredam pada set point.

Pengatur bisa berupa pengatur analog maupun pengatur digital. Pengatur analog berupa pengatur on/off dan pengatur PID (Proporsional Integrator Diffrensiator). Sedangkan pengatur digital bisa berupa sebuah mikrokontroller atau sebuah komputer yang berisikan algoritma-algoritma kontrol yang sesuai. Pengatur ini bisa melekat pada sistem (*embedded control system*)

misalnya mempergunakan mikrokontroler atau bisa berupa kontrol jarak jauh (*remote control system*) baik dengan kabel atau tanpa kabel. Sedangkan aktuator adalah penggerak yang digerakkan oleh sinyal yang dikirimkan pengatur. Aktuator ini berupa motor, kipas, katup, pompa, pematik api. Sedangkan sensor adalah suatu alat yang bisa mengubah besaran fisik seperti gaya, berat, kecepatan, energi elektromagnetik, tekanan, suara, cahaya, temperatur dan sebagainya menjadi sinyal yang dapat diukur dengan mudah misalnya besaran listrik. Jika sinyal dari sensor ini sangat lemah atau penuh dengan gangguan (*noise*) yang muncul dari keterbatasan sensor maka sinyal ini sebelum dilewatkan pada elemen selisih (*difference element*) perlu untuk diperbaiki oleh sebuah pengkondisian sinyal. Elemen selisih biasanya digambarkan dengan tanda penjumlahan atau sumasi yang berada di dalam lingkaran.

Berdasarkan sinyal yang dipergunakan dikenal sistem kontrol pneumatik, hidrolik dan elektrik. Sistem kontrol pneumatik mempergunakan uap air bertekanan tinggi (5-18 psig=pound squares inch gauge) sebagai sinyal pengatur sedangkan sistem hidrolik mempergunakan fluida dengan viskositas tinggi seperti oli atau minyak pelumas. Terakhir adalah sinyal elektrik yang mempergunakan sinyal berupa arus atau tegangan listrik sebagai pembawa informasi. Pemilihan jenis-jenis sinyal ini tergantung dari jenis sistem yang diaturnya (*plant*) misalnya untuk sistem yang berhubungan dengan bahan bakar misalnya sistem bak penampungan bahan bakar maka sangat berbahaya kalau ada lompatan atau percikan bunga listrik sehingga sinyal bersifat pneumatik dan hidrolik lebih aman dipakai.

Jenis-jenis komponen kontrol disesuaikan dengan sinyal yang dipergunakan. Pada sistem kontrol elektronika sinyal yang dibahas adalah sinyal listrik yaitu berupa arus listrik dan tegangan listrik searah (DC=direct current). Sehingga komponen-komponen yang dilibatkannya pun berupa komponen listrik atau elektronika. Misalnya elemen selisih yang dibuat dari sebuah rangkaian differensial amplifier dan pengontrol yang dibuat mempergunakan operational Amplifier untuk memberikan sifat proporsional, integral dan differensial.

1.3. Ilmu Yang Dikaji

Selain ilmu kontrol beberapa disiplin ilmu yang terlibat pada kontrol elektronika adalah ilmu elektronika, matematik dan fisika. Teori rangkaian listrik dan karakteristik komponen elektrik maupun elektronika perlu dikuasai benar-benar. Misalnya jika kita pilih sebuah sensor temperatur termokopel. Termokopel berupa dua kabel logam yang berbeda dilekatkan dan ditaruh pada media yang diukur. Maka kita melihat bahwa termokopel akan menghasilkan listrik pada ujung pertemuan antar kedua kabel jika salah satu pertemuan ujung yang lain ditaruh pada media temperatur acuan. Sifat ini disebut dengan efek Seebeck. Besaran listrik berupa tegangan listrik ini sangat lemah dan tidak linier sehingga perlu rangkaian pengkondisi sinyal berupa rangkaian jembatan.

Itulah salah satu contoh dari penggabungan ketiga ilmu tersebut. Pada bab-bab berikutnya akan banyak ditemui hal yang serupa. Tetapi lebih difokuskan pada listrik arus lemah.

1.4. Keterbatasan dan Kelebihan Kontrol Elektronika

Kontrol elektronika memiliki banyak keterbatasan seperti ketergantungan terhadap sumber daya, sensitivitas aktuator dan sensor yang tidak standar, dapat dipengaruhi oleh gangguan (*noise*) yang berasal dari fluktuasi tegangan catu dan gelombang elektromagnetik, daya tahan komponen terhadap panas dan kondisi lingkungan. Selain kelemahan tersebut terdapat pula kelebihanannya

misalnya kemudahan dalam proses pengkondisian sinyal, pergantian komponen dan perekaman data. Proses pengkondisian sinyal berupa atenuasi (pelemahan), amplifier (penguatan), pemfilteran dapat dengan mudah dilakukan mempergunakan rangkaian elektronika. Komponen-komponen elektronika ini mudah di dapat dan penggantian komponen dapat dilakukan dengan mudah daripada komponen-komponen hidraulik maupun pneumatik yang umumnya berukuran besar. Proses penalaan (*tunning*) pengatur bisa mudah dilakukan sehingga parameter kontrol seperti konstanta proporsional (P), komponen integrator (K_I) dan komponen differensial (KD) dapat dituning dengan mudah.

1.5. Jenis-jenis Pemrosesan Sinyal

Jika berbicara mengenai sinyal listrik terdapat beberapa proses yang bisa dialami oleh sinyal. Proses-proses tersebut berdasarkan cara kerjanya dapat dibedakan menjadi:

- Proses Statis
- Proses Dinamis
- Proses Arithmatika

1.5.1. Proses Statis

Proses statis berupa proses penguatan, limiter (chopper), rectifier atau komparator yang secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 1.1. Pada tabel ini sinyal input yang masuk ke sebuah proses dinyatakan dengan $x(t)$ sedangkan sinyal output yang keluar dari sebuah proses dinyatakan dengan $y(t)$

Tabel 1.1. Proses Statis dari Sinyal Elektronika

Nama	Deskripsi	Grafik
Soft Limiter	$y = \begin{cases} -y_0 & x < -x_0 \\ y_0 \frac{x}{x_0} & x \leq x_0 \\ y_0 & x > x_0 \end{cases}$	
Hard Limiter	$y = \begin{cases} -y_0 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ y_0 & x > 0 \end{cases}$	
Half-wave Rectifier	$y = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ y_0 \frac{x}{x_0} & x > 0 \end{cases}$	

Full-wave Rectifier	$y = y_0 \left \frac{x}{x_0} \right $	
Comparator	$y = \begin{cases} 0 & x \leq x_0 \\ y_0 & x > 0 \end{cases}$	

1.5.2. Proses Dinamik

Proses dinamik berupa proses yang berhubungan dengan perubahan waktu, proses-proses tersebut adalah proses tunda (delay process), integral, differensiator dan kompresi. Persaman matematis antara sinyal output dengan sinyal input dapat dilihat pada Tabel 1.2.

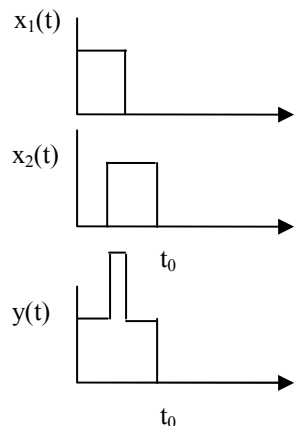
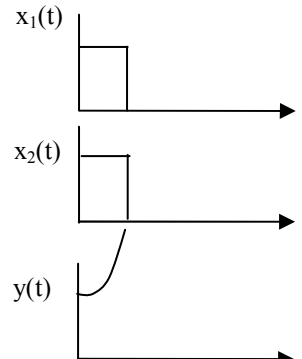
Tabel 1.2. Proses Dinamis dari Sinyal Elektronika

Nama	Deskripsi	Grafik
Delay Process	$y(t) = x(t - t_0)$	
Integrator	$y(t) = K_I \int_{-\infty}^t x(t) dt$	
Diffrensiator	$y(t) = K_D \frac{dx(t)}{dt}$	

1.5.3. Proses Arithmatik

Proses aritmatik pada sinyal berupa proses penjumlahan, selisih dan perkalian. Proses perkalian biasanya dipergunakan pada proses modulasi dan demodulasi sinyal yaitu proses sebuah sinyal elektronika dikalikan dengan sinyal lain yang memiliki frekuensi yang berbeda.

Tabel 1.3. Proses Arithmatik dari Sinyal Elektronika

Nama	Deskripsi	Grafik
Penjumlahan	$y(t) = x_1(t) + x_2(t)$	
Perkalian	$y(t) = x_1(t) * x_2(t)$	

1.6. Jenis-jenis Sinyal

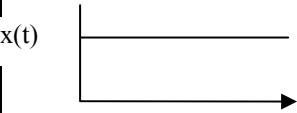
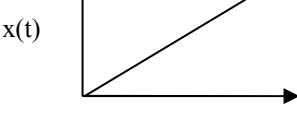
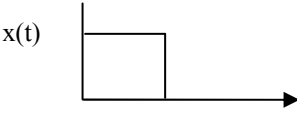
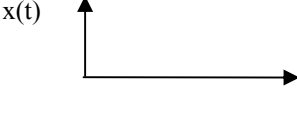


1.6.1. Berdasarkan Bentuk

Sinyal yang mengalir di dalam sistem kontrol terdiri dari sinyal-sinyal sebagai berikut:

- Sinyal Step
- Sinyal drift
- Sinyal Pulsa
- Sinyal Impulse (delta)
- Sinyal Sinus
- Sinyal Acak

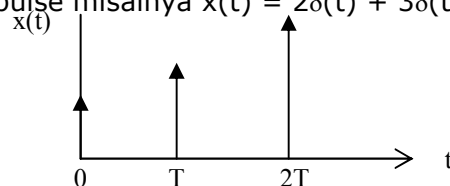
Bentuk-bentuk sinyal tersebut dapat dilihat pada tabel 1.4. Sinyal step bernilai konstan untuk waktu tak hingga sehingga untuk setpoint yang bersifat regulator yaitu selalu konstan nilainya maka sinyal step yang dipergunakan. Sinyal Drift dan impulse biasanya selalu dihindari pada beberapa komponen elektronika karena sinyal drift akan memberikan alat elektronika yang dipergunakan mencapai batas jenuhnya (drift) dan dapat menyebabkan kerusakan. Sedangkan sinyal impulse berupa sinyal kejut yang bisa membuat suatu alat yang tidak sensitif tidak dapat kembali ke posisi semula sehingga menyebabkan terjadinya kerusakan.

Tabel 1.4. Jenis-jenis Sinyal

Nama	Deskripsi	Grafik
Step	$x(t) = u(t)$; huruf u menyatakan fungsi sinyal Step	
Drift	$x(t) = kt$	
Pulsa	$x(t) = r \left(\frac{t}{\tau} \right)$	
Impulse	$x(t) = \delta(t)$	
Sinus	$x(t) = A \sin(2\pi ft)$	
Acak (random)		

1.6.2 Berdasarkan keberadaan

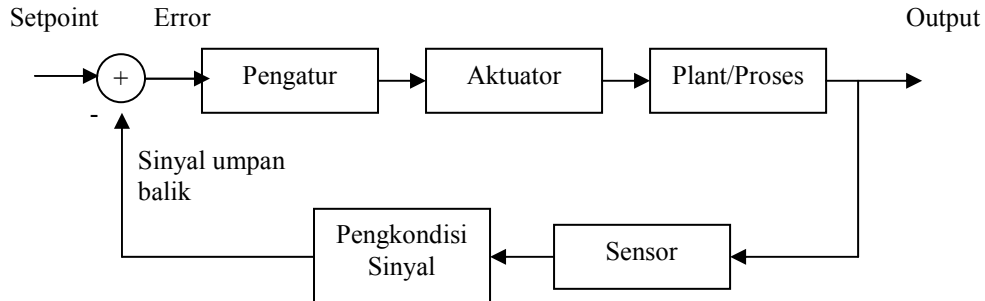
Sedangkan berdasarkan keberadaannya dikenal sinyal kontinu dan sinyal diskrit sinyal kontinu adalah sinyal yang disetiap waktu memiliki nilai sedangkan sinyal diskrit adalah sinyal yang hanya bernilai pada waktu-waktu tertentu atau pada kelipatan dari perioda tertentu. Biasanya sinyal ini diperoleh dari hasil pencacahan (sampling) sinyal analog menjadi digital. Sinyal diskrit secara matematis dinyatakan sebagai kumpulan dari penjumlahan sinyal impulse misalnya $x(t) = 2\delta(t) + 3\delta(t-T) + 10\delta(t-2T)$



Gambar 1.1. Sinyal Diskrit

1.7. Diagram Blok Sistem Kontrol

Biasanya suatu sistem kontrol yang sangat kompleks disederhanakan dengan menggambarkan dalam bentuk diagram blok. Setiap komponen-komponen dalam sistem kontrol dinyatakan sebagai kotak dan sinyal input maupun output dinyatakan dengan garis panah. Diagram blok secara lengkap untuk sinyal kontinu dapat dilihat pada gambar 1.2.



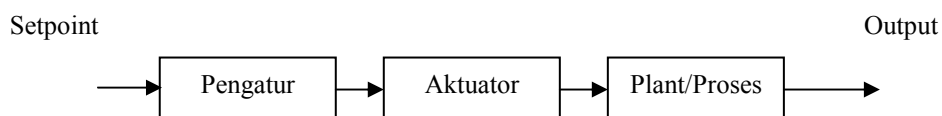
Gambar 1.2. Diagram blok sistem kontrol kontinu

Gambar ini memperlihatkan suatu sistem kontrol otomatis yang dikendalikan oleh pengontrol. Nilai setpoint merupakan target yang akan dikejar oleh sistem ini atau nilai kontrol yang diinginkan. Jika output yang terdeteksi oleh alat ukur tidak sama dengan nilai setpoint maka akan terjadi error. Error atau kesalahan diperoleh dari selisih antara setpoint dengan sinyal umpan balik. Error dinyatakan dengan setpoint dikurangi sinyal umpan balik. Jika error positif berarti setpoint belum terlampaui sedangkan bila error negatif berarti sinyal umpan balik lebih besar nilainya dari setpoint. Pengkondisi sinyal merupakan komponen yang tidak harus selalu ada, hanya diadakan pada kasus tertentu misalnya jika sinyal yang dikeluarkan dari sensor terlalu lemah sehingga perlu dikuatkan atau jika sensor bersifat non linier sehingga perlu dilinierisasikan.

Alat ukur biasanya digambarkan hanya dengan sensor saja. Sensor merupakan pengindera yang mampu mendeteksi perubahan fisik seperti panas, panjang, suara, gelombang elektromagnetik, kecepatan dan lain-lain menjadi besaran lain yang mudah diukur misalnya besaran listrik. Inilah prinsip dari sebuah alat ukur, terkadang sensor disebut juga sebagai transduser karena kemampuannya untuk mengubah bentuk energi fisik menjadi energi lain yang terukur.

Sedangkan aktuator adalah alat penggerak yang menerima sinyal kontrol dari pengatur. Aktuator ini bisa berupa motor, pompa, katup, propeller, pemanas. Sedangkan plant atau proses adalah sistem yang dikontrol

Diagram blok dengan umpan balik ini disebut dengan sistem kontrol umpan balik (*feedback control system*) sedangkan jika suatu sistem kontrol tidak memerlukan alat ukur maka dikenal dengan sistem kontrol umpan maju (*feedforward control system*) pada sistem kontrol umpan maju ini tidak dilakukan pengontrolan berdasarkan error secara otomatis karena sistem dengan jenis ini biasanya tidak dilakukan terus menerus dan outputnya selalu cepat untuk mencapai target kontrol. Terkadang output dinyatakan sebagai variabel kontrol

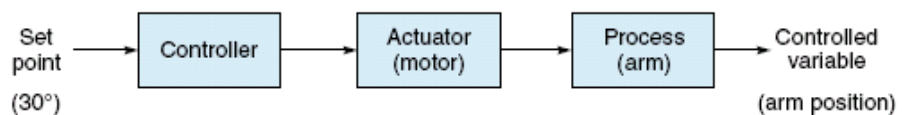


Gambar 1.3. Diagram Blok sistem umpan maju

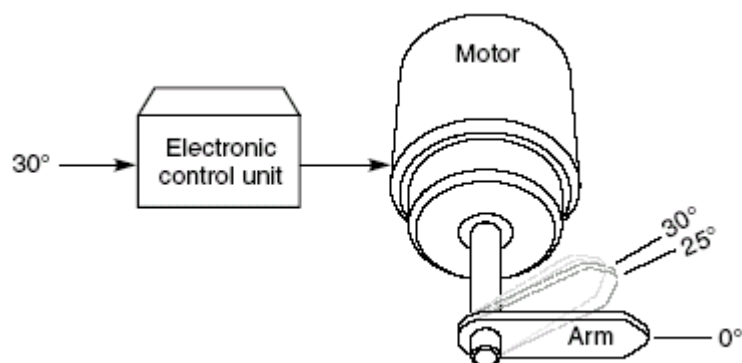
Sedangkan lingkaran dengan tanda positif di tengahnya menggambarkan sebuah penyalin atau penjumlah. Jika dipandang pada arah tanda panahnya, sistem umpan balik dapat disebut dengan sistem lup tertutup (*Close Loop System*) sedangkan sistem kontrol umpan maju dapat disebut dengan sistem lup terbuka (*Open Loop System*)

Contoh 1.1.

Pada gambar 1.4 di bawah ini diperlihatkan sistem lup kontrol terbuka. Aktuatornya adalah sebuah motor yang menggerakkan lengan robot (robot arm). Pada kasus ini yang menjadi plantnya adalah pergerakan lengan dan variabel yang diatur adalah sudut dari lengan. Pengujian awal menunjukkan bahwa motor memutar lengan 4 derajat per detiknya. Diasumsikan bahwa pengatur langsung menggerakkan lengan dari 0° sampai 30° . Dengan karakteristik plant ini pengatur mengirimkan 6 detik pulsa daya ke motor. Jika motor bergerak sebagaimana mestinya maka motor akan berputar tepat 30° dalam 6 detik dan berhenti. Saat hari dingin, oli menjadi sangat kental (tebal) sehingga gaya gesek di dalam motor menjadi lebih besar dan motor hanya berputar 25° dalam 6 detik dan hasilnya 5° error. Pengatur tidak dapat tahu error ini dan tidak bisa melakukan apa-apa untuk memperbaikinya.



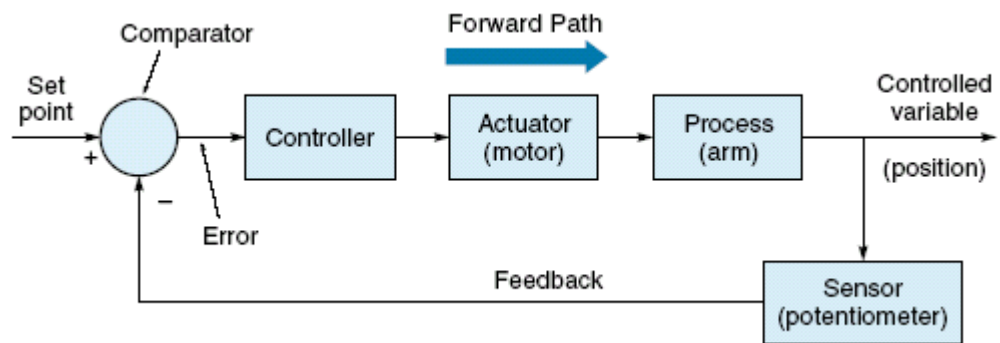
a) Diagram Blok



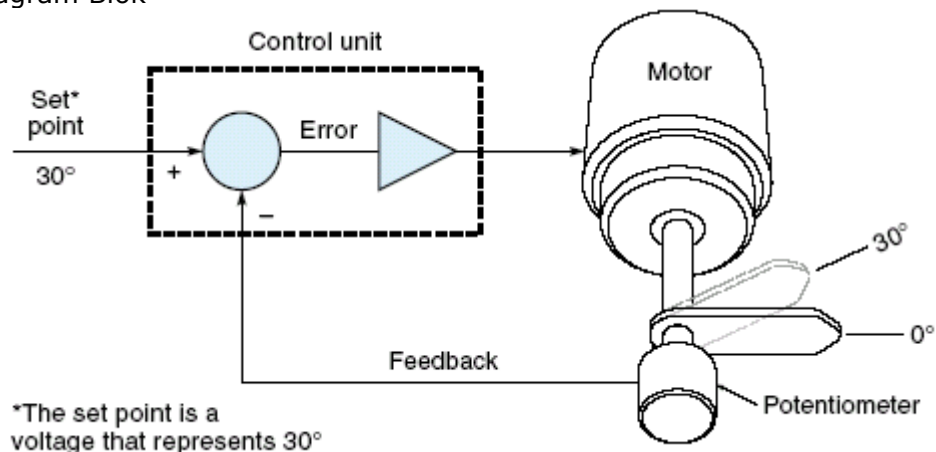
b) Sistem kontrol posisi sederhana dengan lup terbuka

Gambar 1.4 Sistem kontrol posisi sudut dengan lup terbuka

Jika pada contoh 1.1. ini ingin ditambahkan pengkoreksi yang mampu menyesuaikan terhadap error yang terjadi maka biasanya digunakan sebuah sensor yang bisa mengukur sudut misalnya potensiometer. Pemasangan potensiometer dapat dilihat pada gambar 1.5. di bawah ini



a) Diagram Blok



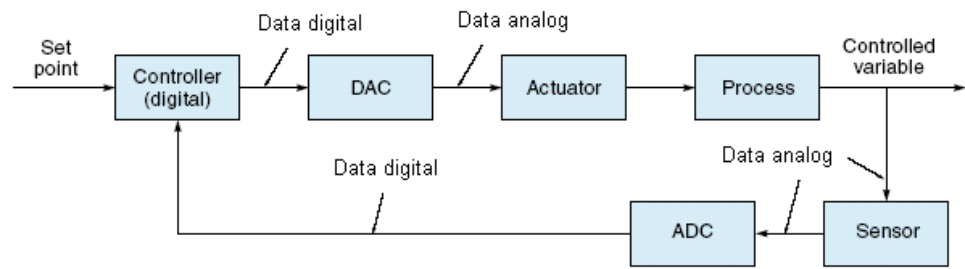
b) Penambahan pengkoreksi dan sensor potensiometer
Gambar 1.5. Diagram blok kontrol posisi dengan lup tertutup

1.8. Sistem Kontrol Analog dan Digital

Pada sistem kontrol analog, pengontrol atau pengatur terdiri dari perangkat analog tradisional misalnya amplifier. Sistem kontrol yang pertama adalah analog karena pada saat itu hanya teknologi itu yang memungkinkan. Setiap nilai setpoint dan perubahan pada sinyal umpan balik diindera dengan cepat dan amplifier langsung mengeluarkan output yang sesuai ke aktuator.

Pada sistem kontrol digital, pengontrol atau pengatur menggunakan rangkaian digital. Yang umumnya rangkaian digital ini berupa sebuah komputer yaitu bisa mikroprosesor atau mikrokontroler. Komputer mengeksekusi program yang mengulang terus menerus membaca nilai setpoint dan data dari sensor. Kemudian komputer menggunakannya untuk menghitung output dari pengatur yang dikirimkan ke aktuator. Kemudian program memulai lagi dari awal. Waktu total program sampai pengiriman output tidak lebih dari 1 mili detik. Sistem digital hanya mengecek input pada waktu-waktu tertentu saja dan memberikan output pembaruannya kemudian. Jika input berubah setelah komputer mengecek berarti input ini lolos tidak terdeteksi sampai pengecekan berikutnya. Inilah perbedaan dasar antara sistem kontrol digital dengan analog.

Pada dunia real besaran yang digunakan adalah analog oleh karena itu untuk masuk ke pengatur digital perlu ada rangkaian pengubah dari besaran analog ke besaran digital yang disebut dengan Analog to Digital Converter (ADC). Demikian juga besaran dari pengatur digital perlu diubah kembali ke besaran analog agar sesuai dengan besaran yang dipergunakan oleh aktuator. Rangkaian pengubah besaran digital ke analog ini disebut dengan Digital to Analog Converter (DAC). Maka diagram blok sistem lup tertutupnya berubah menjadi seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.6.



Gambar 1.6. Diagram Blok Sistem Kontrol Digital

Bab II

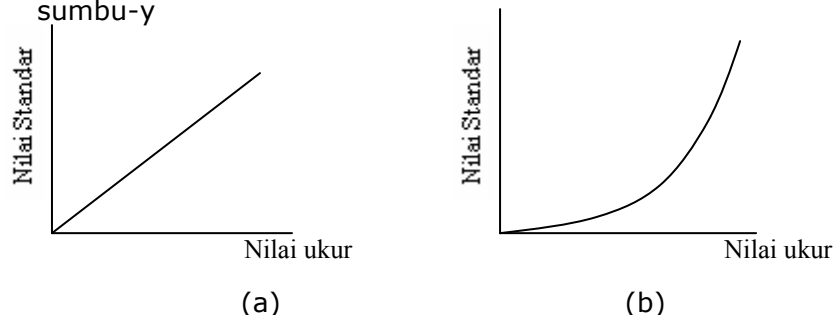
Sensor

2.1. Pendahuluan

Sesuai dengan banyaknya jenis kontrol, maka sensor jenisnya sangat banyak sesuai dengan besaran fisik yang diukurnya seperti temperatur, posisi, kecepatan, cahaya, suara, tekanan, kelembaban dan sebagainya serta sesuai dengan besaran keluarannya seperti sensor listrik dan pneumatik. Tetapi pada pembahasan ini lebih banyak ditekankan pada sensor listrik yang menghasilkan keluaran dalam bentuk tegangan listrik atau arus listrik.

Beberapa karakteristik sensor yang perlu diketahui dalam penentuan jenis sensor adalah :

- a) Kepekaan (Sensitivitas)
Kecepatan dari suatu sensor untuk meresponi terhadap perubahan inputnya.
- b) Waktu tanggap (respon waktu)
Waktu yang diperlukan oleh sensor untuk mengeluarkan output yang stabil dan dapat dijadikan nilai pengukuran. Misalnya untuk mengukur termometer tidak dapat langsung tapi perlu ditunggu sebentar sampai outputnya stabil. Waktu tunggu adalah waktu tanggap dari termometer.
- c) Akurasi (Ketepatan)
Nilai ukur yang dibandingkan terhadap nilai benar (true value) yang diperoleh dengan mempergunakan alat ukur standar. Jika suatu alat ukur atau sensor akurasi berubah dapat dikembalikan dengan cara kalibrasi atau peneraan.
- d) Tahan terhadap noise
Kemampuan untuk tahan terhadap besaran fisik pengganggu yang disebut dengan noise atau derau. Noise ini bisa berupa temperatur, gelombang EM atau besaran lain yang mempengaruhi sensor saat dipergunakan.
- e) Harga
Harga merupakan faktor ekonomis yang selalu dikompromikan dengan kriteria yang lain
- f) Linieritas
Sifat sensor yang menampilkan output yang berbanding lurus dengan penambahan input. Biasanya linieritas dapat diuji melalui kurva kalibrasi yang diperoleh dengan mencantumkan nilai pertambahan sensor pada sumbu-x dan memasangkannya dengan nilai ukur alat standar pada sumbu-y

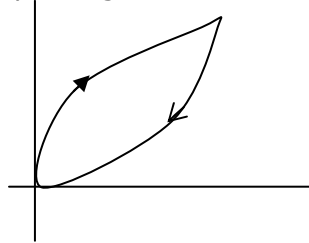


Gambar 2.1.a) Linier b) Non linier

- g) Bandwidth
Lebar rentang frekuensi ukur dari sensor. Jika besaran fisik memiliki komponen frekuensi yang berada di luar rentang sensor maka komponen fisik tersebut tidak dapat terukur.

h) Histerisis

Kenaikan dan penurunan input dapat membuat kurva pengukuran yang berbeda pada sensor. Biasanya histerisis terjadi pada sensor-sensor yang bersifat menyerap energi.



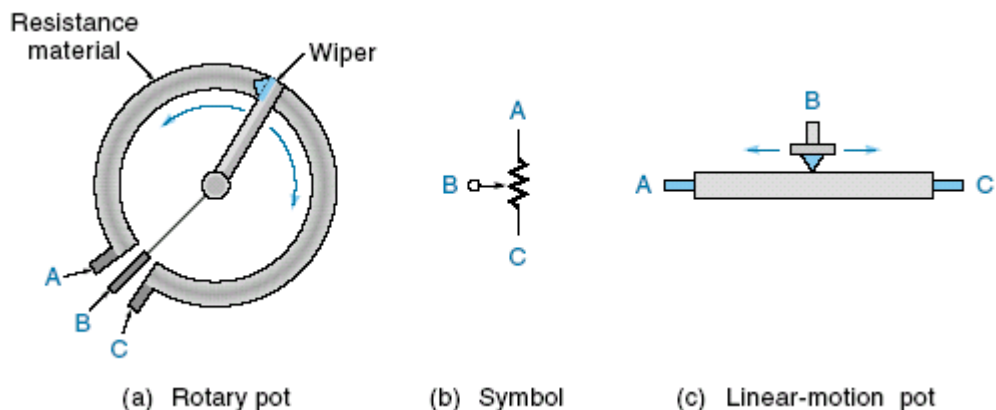
Gambar 2.2. Kurva histerisis

i) Resolusi

Resolusi adalah perubahan terkecil dari besaran fisik yang masih dapat terdeteksi oleh sensor

2.2. Sensor Posisi

Posisi ini bisa berupa posisi secara linier atau berupa posisi sudut. Jenis sensor posisi berupa potensiometer diperlihatkan pada gambar 2.3. Potensiometer dapat digunakan untuk mengubah perpindahan rotasi atau perpindahan linier (lurus) menjadi tegangan. Sebenarnya potensiometer itu sendiri adalah sebuah resistor.



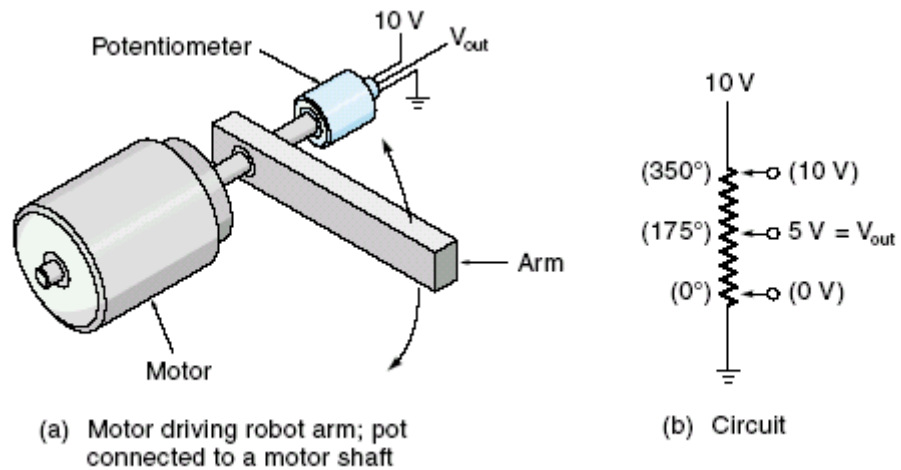
Gambar 2.3. Potensiometer

Pada gambar 2.3. ini diperlihatkan cara kerja potensiometer. Potensiometer terdiri dari bahan dengan tahanan yang uniform yaitu nilai ohm per incinya selalu konstan. Pada Rotary Potentiometer, Saat wiper berputar maka besar tahanan total akan ikut berubah. Poros dari wiper biasanya ditempelkan pada poros benda berputar.

Contoh 2.1.

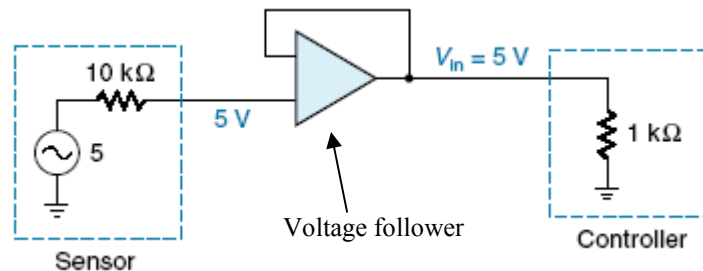
Misalkan saat wiper berada di atas output (gambar 2.4) yang dihasilkan 10V yaitu pada sudut 350° , sedangkan saat wiper ditengah menghasilkan output 5 V yaitu pada sudut 175° . Maka berapakah tegangan yang dihasilkan pada saat wiper menunjukkan sudut 82°
Jawab:

Tegangan yang dihasilkan pada sudut $82^\circ = 82^\circ \times (10 \text{ V}/350^\circ) = 2,34 \text{ Vdc}$



Gambar 2.3. Potensiometer sebagai alat ukur posisi

Potensiometer yang sedang dibicarakan sebenarnya adalah pembagi tegangan (voltage divider) dan akan bekerja baik jika arus listrik yang sama mengalir di seluruh tahanan potensiometer. Kesalahan pembebanan (loading error) terjadi saat wiper dari potensiometer dihubungkan dengan rangkaian yang memiliki tahanan input tidak terlalu besar dari tahanan potensiometer. Sehingga arus yang melewati wiper berkurang dan menyebabkan pembacaan tegangan menjadi berkurang. Hal ini dapat diatasi dengan rangkaian buffer impedansi tinggi misalnya menggunakan voltage follower yang dipasang diantara potensiometer dengan rangkaian yang diukur.



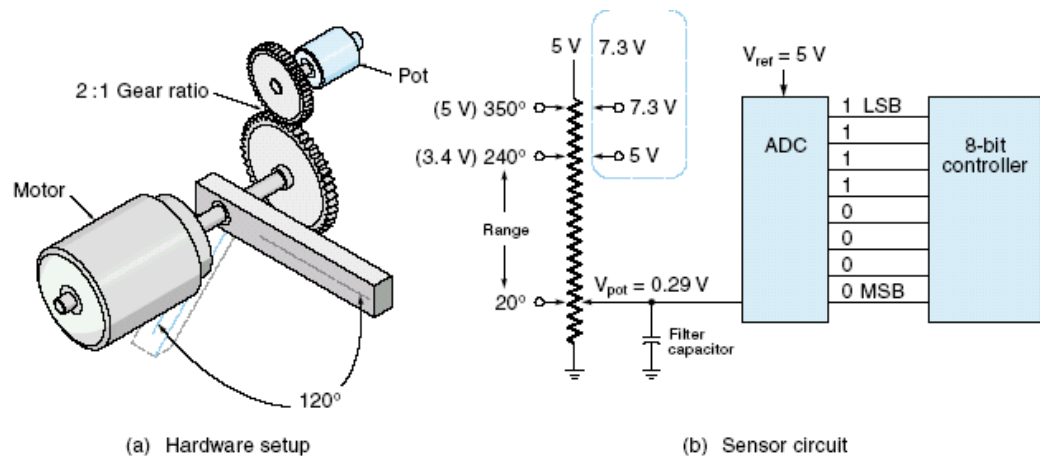
Gambar 2.4 Voltage follower untuk mengurangi pembebanan

Contoh 2.2.

Lengan robot pada gambar 2.5. berputar 120° stop to stop dan potensiometer digunakan sebagai sensor posisi. Pengontrol adalah sistem digital 8 bit dan perlu mengetahui posisi saat itu dengan resolusi $0,5^\circ$.

Jawaban:

Untuk memperoleh resolusi $0,5^\circ$ berarti seluruh 120° harus dibagi menjadi 240 kenaikan dan setiap kenaikan bernilai $0,5^\circ$. Bilangan 8 bit memiliki 255 tingkat (dari 0000 0000 sampai 1111 1111) jadi cukup untuk pekerjaan ini. Potensiometer disuplai dengan tegangan 5V sehingga output dari potensiometer adalah 5V untuk sudut maksimum 350° (jika diasumsikan potensiometer dapat berotasi penuh). Tegangan acuan dari ADC (analog to digital converter) juga 5 V sehingga jika tegangan keluaran potensiometer 5V berarti output digitalnya adalah 255 ($1111\ 1111_{\text{bin}}$). Potensiometer berputar 350° tetapi lengan robot hanya berputar 120° sehingga perbandingan roda gigi 2:1. Dengan kontrol ini potensiometer berputar 240° saat lengan robot berputar 120° .



Gambar 2.5. Potensiometer sebagai sensor putaran pada lengan robot

Misal saat lengan robot berputar 10° maka potensiometer akan berputar 20° . Dan tegangan potensiometer adalah : $20^\circ \times (5 \text{ V}/350^\circ) = 0,29 \text{ V}$. Tegangan ini akan diubah oleh ADC menjadi besaran digital : $0,29 \text{ V} \times (255/5\text{V}) = 14,8 \approx 15 = 0000 \ 1111_{\text{bin}}$

Kembali ke masalah resolusi dari pengukuran ini adalah :

$$\frac{1^\circ_{\text{arm}}}{2^\circ_{\text{pot}}} \times \frac{350^\circ_{\text{pot}}}{5 \text{ V}} \times \frac{5 \text{ V}}{255 \text{ states}} = \frac{0.686^\circ_{\text{arm}}}{\text{state}}$$

Gears Pot ADC

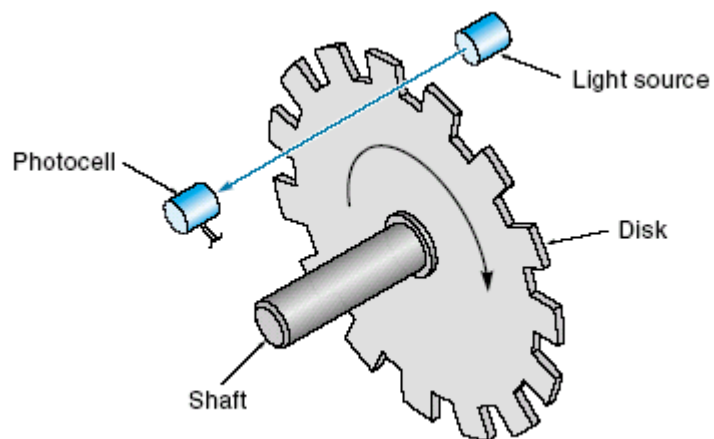
Ternyata resolusinya $0,686^\circ$ sedangkan yang diminta adalah $0,5^\circ$ untuk mengatasi hal ini. Untuk meningkatkan resolusi ini kita lihat kembali. Persamaan ini kita hitung dengan asumsi potensiometer mengeluarkan 5V pada 350° tetapi potensiometer sebenarnya hanya menggunakan 240° saja. Oleh karena itu untuk meningkatkan resolusi dapat diatur dengan meningkatkan tegangan $7,3 \text{ V}$ ($5 \text{ V} \times 350^\circ/240^\circ$). Sehingga resolusinya sekarang:

$$\frac{1^\circ_{\text{arm}}}{2^\circ_{\text{pot}}} \times \frac{350^\circ}{7.3 \text{ V}} \times \frac{5 \text{ V}}{255 \text{ states}} = 0.470^\circ/\text{state}$$

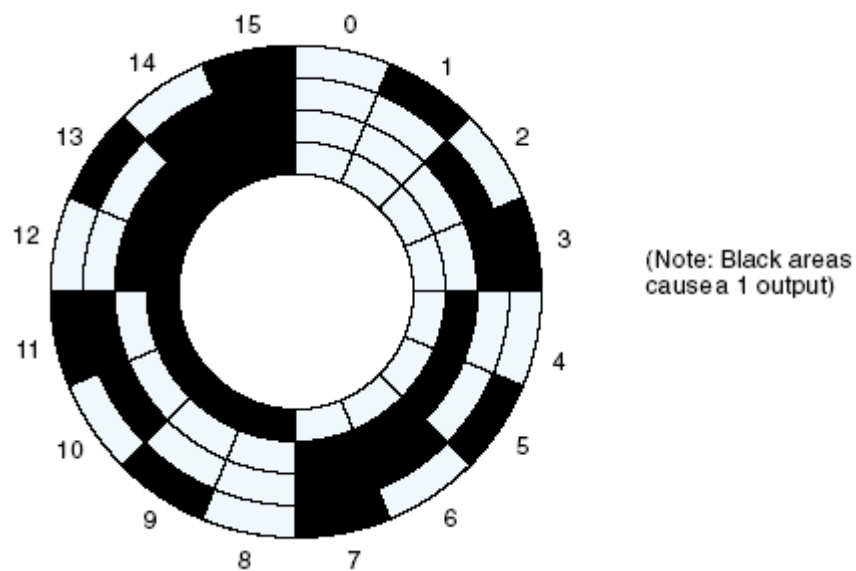
Resolusi ini masih dalam jangkauan $0,5^\circ$ sesuai spesifikasi

Optical Rotary Recorder

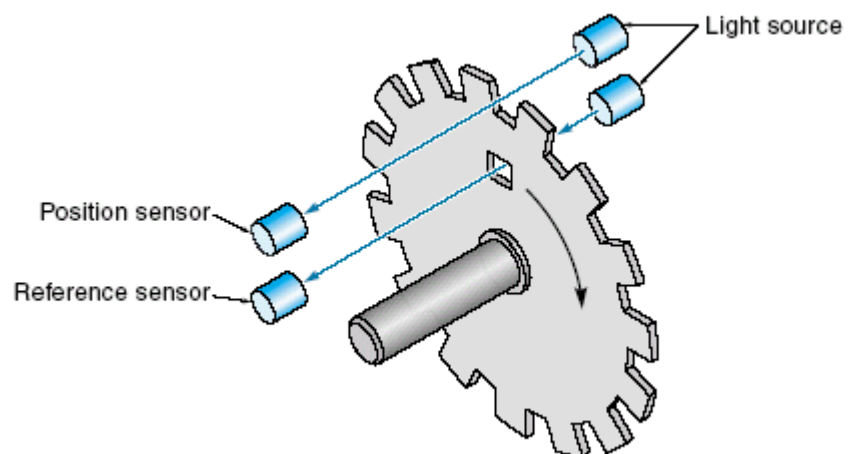
Optical Rotary Recorder menghasilkan output sudah dalam bentuk data digital sehingga tidak memerlukan ADC. Konsepnya dapat dilihat pada gambar 2.6. Sebuah piringan dipasang pada batang berputar, sumber cahaya dan sebuah sensor fotosel dipasang sedemikian rupa sehingga slot pada piringan akan melewati berkas cahaya saat piringan berputar. Terdapat dua jenis optical rotary encoder yaitu absolute encoder dan incremental encoder. Absolute encoder terbuat dari piringan gelas yang diberi penanda pada traknya konsentriknya. Cahaya yang lewat akan merepresentasikan bilangan digital yang berbeda. Sedangkan incremental encoder hanya terdiri dari satu lubang, keluaran dari incremental encoder hanya jumlah pulsa.



Gambar 2.6. Optical Rotary Encoder



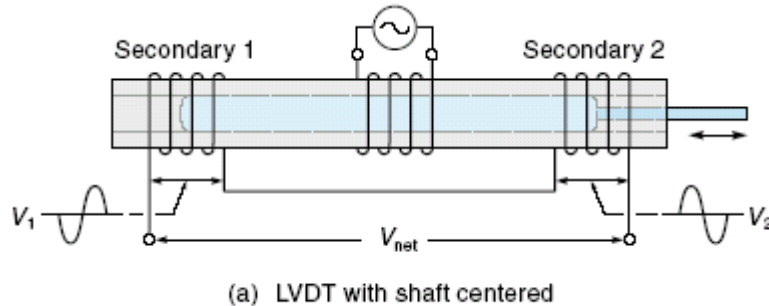
Gambar 2.7. Absolute Optical Rotary Encoder



Gambar 2.8. Incremental Optical Rotary Encoder

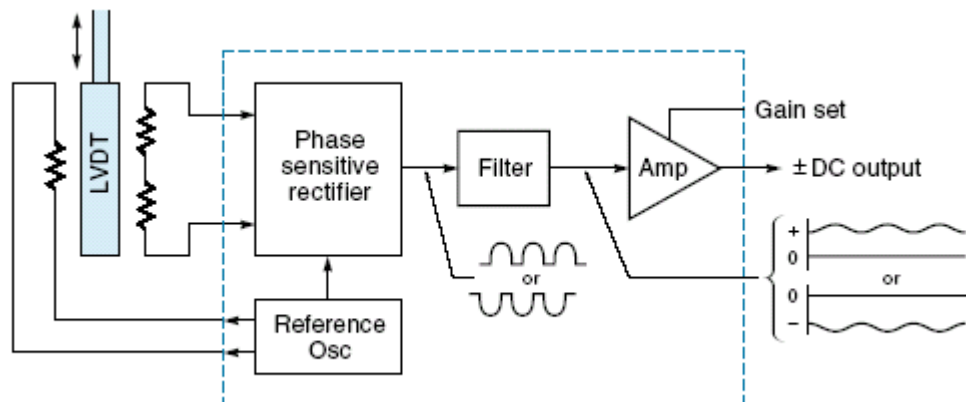
Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

Linear Variable Transformer (LVDT) adalah sensor posisi dengan resolusi tinggi yang menghasilkan tegangan AC dengan magnituda berbanding lurus terhadap posisi lurus. LVDT memiliki kelebihan karena tidak terjadi gesekan. Gambar 2.9. memperlihatkan LVDT dengan tiga kumparan dan sebuah batang besi yang dapat bergerak. Kumparan tengah yang disebut kumparan primer dihubungkan dengan tegangan acuan AC. Kedua kumparan luar disebut kumparan sekunder yang keduanya dipasang secara seri.



Gambar 2.9. Linier Variable Differential Transformer

Saat batang besi bergerak maka akan terjadi tegangan induksi pada kumparan sekunder. Tegangan induksi ini yang dikonversikan menjadi posisi linier yang diukur.



Gambar 2.10 Rangkaian Pengukuran Posisi Menggunakan LVDT

2.3. Sensor Kecepatan Sudut (*Angular Velocity Sensors*)

Sensor kecepatan sudut atau tachometer adalah sensor yang menghasilkan output berbanding lurus dengan kecepatan sudut. Sensor-sensor ini banyak digunakan pada sistem kontrol kecepatan motor.

Kecepatan dari Sensor Posisi

Kecepatan adalah laju perubahan posisi yang secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Kecepatan} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

$\Delta\theta$ = perubahan sudut

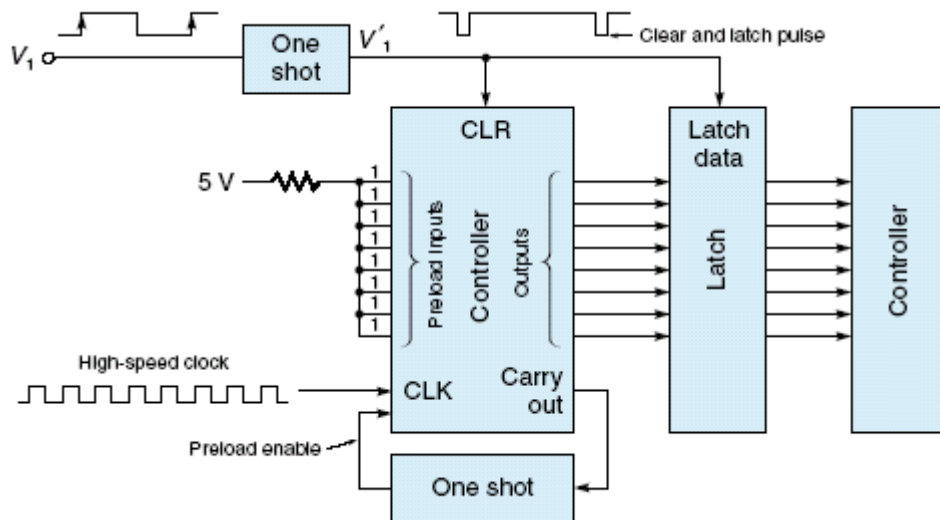
Δt = perubahan waktu

θ_2, θ_1 = posisi sudut

t_2, t_1 = waktu yang diambil dari masing-masing posisi sudut

Karena komponen kecepatannya hanya posisi dan waktu tidak sulit mencari informasi kecepatan. Sehingga hanya dengan menggunakan sensor posisi seperti potensiometer kecepatan dapat diukur tanpa harus membuat sensor kecepatan.

Kecepatan dapat diperoleh dari optical rotary encoder dengan dua cara. Cara pertama adalah metoda yang sama dengan potensiometer, sedangkan cara kedua adalah menentukan waktu yang diperlukan oleh setiap slot disk untuk lewat. Semakin lambat kecepatan semakin lama waktu yang diperlukan setiap slot untuk melewati sensor optik. Rangkaian digital counter pada gambar 2.11. dapat digunakan sebagai timer untuk mengukur berapa lama waktu yang diperlukan slot untuk lewat.



Gambar 2.2. Rangkaian untuk menghitung waktu siklus slot (slot-cycle time) yang digunakan untuk menentukan posisi dari incremental encoder

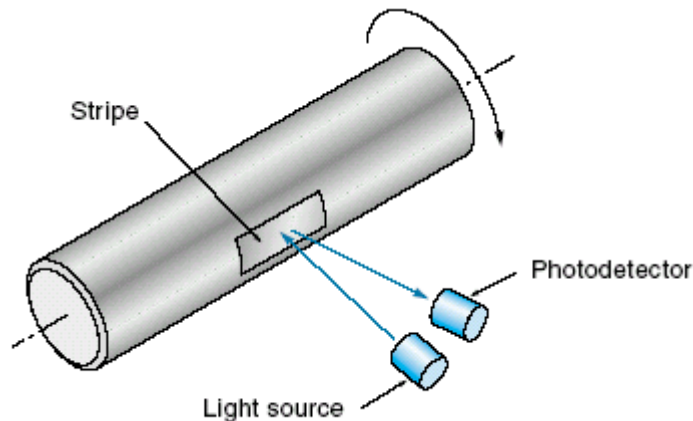
Idenya adalah menghitung siklus dari clock kecepatan tinggi (high-speed clock) selama satu periode slot. Perhitungan terakhir akan sebanding dengan waktu yang diperlukan slot untuk lewat. Cara kerja rangkaian 2.11 adalah sebagai berikut. Salah satu keluaran dari optical encoder (sebut saja V_1) digunakan sebagai input dari timer. V_1 memicu sinyal one-shot untuk menghasilkan V'_1 yang merupakan pulsa negatif untuk men-clear-kan counter. Saat V'_1 high (menghilangkan clear), high-speed clock dihitung oleh counter. Saat slot berikutnya memicu kembali one-shot, data dari counter dikirimkan ke latch terpisah dan counter kembali clear dan siap untuk memulai lagi. Pengatur (controller) membaca hasil perhitungan (count) dan latch. Nilai hasil perhitungan ini sebanding dengan kecepatan sudut.

Semakin lambat kecepatan semakin besar hasil perhitungan ini. Artinya untuk kecepatan terlambat nilai counter bisa melewati batas hitung dan kembali ke nilai 0 lagi. Juga saat piringan encoder tiba-tiba diam maka beberapa counter bisa melewati batas hitung. Untuk mengatasi masalah ini ditambahkan rangkaian khusus yang menggunakan one-shot. Setiap kali counter naik, sinyal one-shot dihasilkan dan mengeluarkan nilai 1 detik untuk setiap bit. Akasi ini mencegah counter yang penuh (full counter) berubah ke 0. Sehingga bagi pengatur full counter diinterprestasikan sebagai kecepatan yang terlalu rendah untuk diukur.

Tachometers

Tachometer optik adalah alat ukur sederhana yang dapat menentukan laju dari batang yang berputar per menit ($\text{rpm} = \text{revolution per minute}$). Pada gambar 2.12 diperlihatkan sebuah pita pemantul ditempatkan pada batang berputar. Sebuah sensor cahaya ditempatkan sedemikian rupa sehingga mampu mengeluarkan sebuah pulsa setiap kali pita melewati sensor. Periode dari bentuk gelombang ini berbanding terbalik dengan rpm dari batang dan periode ini dapat diukur menggunakan rangkaian counter.

Tetapi rangkaian dengan satu sensor cahaya ini tidak dapat menentukan posisi dan arah putar. Jika ditambahkan menjadi dua sensor cahaya dan dengan memperhatikan fasa gelombangnya maka arah putar batang.

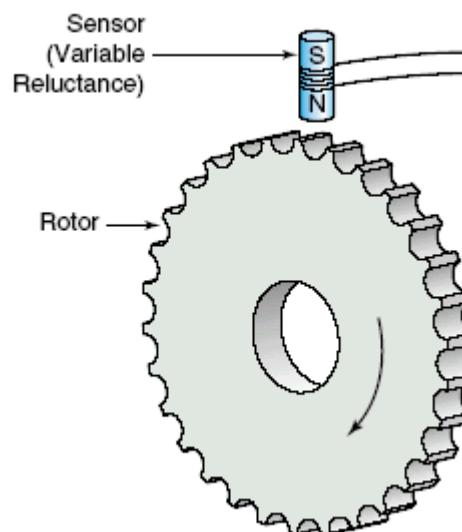


Gambar 2.12. Tachometers Optik

Beberapa jenis tachometers yang lain adalah Toothed-Rotor Tachometers dan Direct Current Tachometers.

Toothed-rotor Tachometer

Toothed-rotor Tachometer terdiri dari sensor yang diam dan sensor yang berputar yang bergerigi (toothed) berupa roda besi (Gambar 2.13) .



Gambar 2.13. Toothed-rotor Tachometer

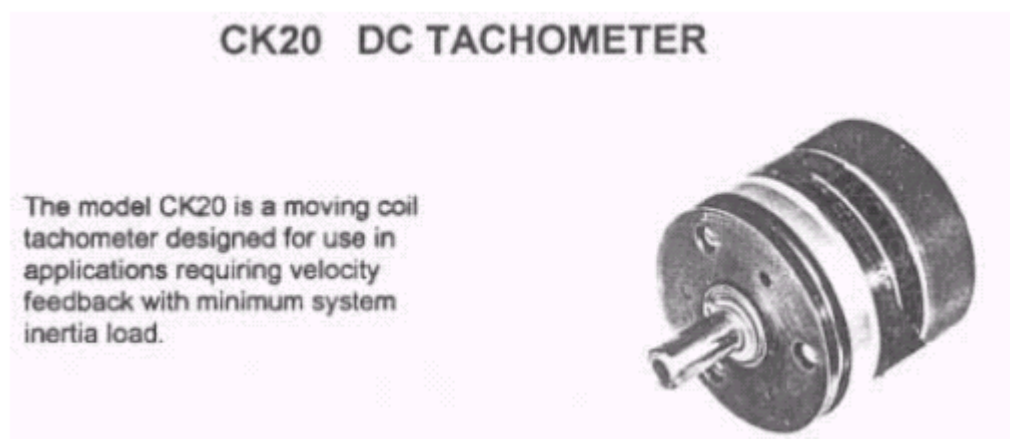
Roda bergerigi ini bisa dipasangkan pada bagian yang akan diukur misalnya batang (*shaft*) pada mesin mobil. Sensor membangkitkan sebuah pulsa setiap kali gigi lewat. Kecepatan angular dari roda sebanding dengan frekuensi pulsa.

Contoh jika roda memiliki 20 gigi maka akan terdapat 20 pulsa setiap putaran. Terdapat dua jenis toothed-motor tachometer yaitu variable reluctance sensor yang terdiri dari sebuah magnet dengan kumparan yang melilitnya (lihat gambar 2.13). Setiap kali gigi besi melewati magnet, medan magnetik di dalam magnet akan meningkat dan menghasilkan tegangan induksi di dalam kumparan. Pulsa-pulsa ini dikonversikan gelombang kotak ideal menggunakan rangkaian threshold detector (sejenis limiter lihat kembali bab 1).

Tipe yang lain adalah sensor adalah Hall-Effect sensor. Di mulai di tahun 1879 E.H. Hall mencetuskan efek dengan namanya, ia menemukan sifat khusus dari tembaga yang kemudian disebut semikonduktor. Semikonduktor menghasilkan tegangan saat berada di dalam medan magnet, khususnya saat menggunakan jenis germanium dan indium. Jadi sensor hall-effect ini menghasilkan output tegangan saat medan magnetik meningkat, yang terjadi saat menggerakkan magnet atau dengan mengganti lintasan medan magnetik. Tetapi tegangan Hall tidak bergantung pada pergerakan medan magnetik hanya terjadi karena ada medan magnetik disekitar kumparan.

Direct Current Tachometers

Direct Current Tachometers sebenarnya adalah generator DC yang menghasilkan tegangan yang sebanding dengan kecepatan putar batang (*shaft velocity*). Polaritas tegangan ditentukan oleh arah dari putaran. Biasanya jenis DC tachometer ini terdiri dari permanen magnet yang diam dan bagian yang berputar yang terdiri dari kumparan. Disain ini mempertahankan inersia turun tetapi tetap diperlukan sisir sentuh yang bisa usang jika terus menerus digunakan. Meskipun demikian tetap jenis ini menghasilkan konversi langsung dari kecepatan putar ke tegangan.



Gambar 2.14 DC Tachometer

2.4. Sensor Jarak (Proximity Sensor)

Limit Switches

Proximity Sensor memberitahu pengatur apakah suatu bagian bergerak sudah ada pada posisi tertentu. Limit switch adalah contoh dari proximity sensor. Sebuah limit switch secara mekanik berupa tombol switch tekan yang dipasang pada suatu ujung batang atau bagian mekanik tertentu dan akan teraktifkan saat batang atau bagian mekanik tersebut menyentuh ujung batas yang diinginkan. Contohnya pembuka pintu garasi otomatis, yang perlu diketahui oleh pengontrol hanya apakah pintu sudah terbuka penuh atau tertutup penuh. Limit switch dapat mendeteksi kedua kondisi tersebut.

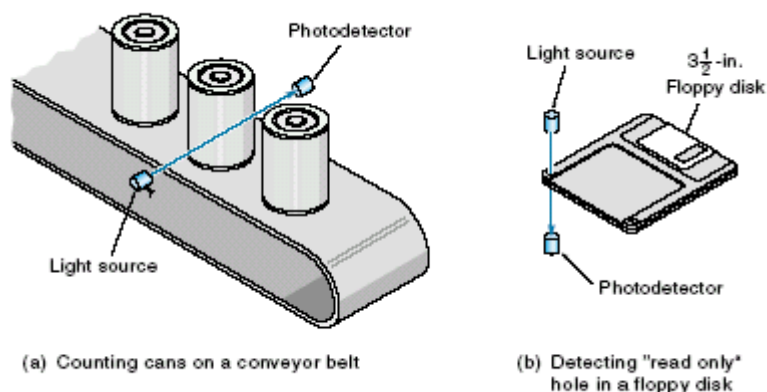
Limit switch digunakan pada banyak aplikasi tetapi memiliki dua kelemahan yaitu : (1) Sebagai alat mekanik limit switch lambat laun akan aus oleh penggunaan (2) Memerlukan gaya tertentu untuk mengaktifkannya.

Proximity sensor yang lain yang tidak mengalami masalah ini adalah jenis optik, magnetik dan ultrasonik yang mendeteksi jarak dari suatu obyek yang mendekat. Tetapi jenis-jenis ini memerlukan peralatan elektronik tambahan.

Optical Proximity Sensor

Optical Proximity Sensor sering disebut interrupters, sensor ini menggunakan sebuah sumber cahaya dan sebuah sensor cahaya yang dipasang sedemikian rupa sehingga obyek yang akan dideteksi memotong lintasan cahaya. Gambar 2.15 memperlihatkan dua aplikasi yang mempergunakan photodetector. Pada Gambar 2.15 (a) sebuah photodetector menghitung jumlah kaleng pada sebuah deretan perakitan, dan pada Gambar 2.15 (b) sebuah photodetector menentukan apakah lubang read-only pada sebuah floppy disk terbuka atau tertutup.

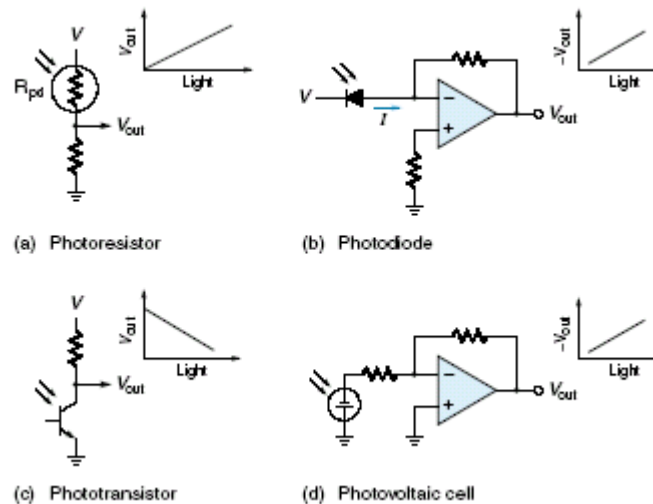
Optical proximity sensor biasanya sering menggunakan sebuah reflektor pada suatu sisi yang memungkinkan detektor dan sumber cahaya dipasang pada sisi yang sama. Serta sumber cahaya dapat dimodulasikan untuk memberikan berkas penanda yang unik sehingga detektor dapat membedakan antara berkas dan cahaya sekitar.



Gambar. 2.15 Dua aplikasi photodetector

Empat tipe photodetektor yang sering digunakan adalah photoresistor, photodiode, phototransistor dan photovoltaic cell. Sebuah photoresistor dibuat dari bahan Cadmium Sulfida (CdS) yang memiliki sifat bahwa tahanan atau resistansinya akan menurun saat tingkat cahaya yang mengenainya meningkat. Alat ini tidak terlalu mahal dan cukup sensitif, tahananannya dapat berubah dalam seperseratusnya atau lebih saat dikenai cahaya dibandingkan di dalam gelap.

Gambar 2.16 (a) memperlihatkan rangkaian antarmuka, saat cahaya meningkat R_{pd} (Tahanan photodetector) akan menurun dan V_{out} meningkat. Sebuah photodiode adalah sebuah dioda peka cahaya. Jendela kecil menyebabkan cahaya jatuh langsung pada sambungan PN (PN Junction) yang pada tempat ini terjadi efek peningkatan arus kebocoran balik (*reverse-leakage current*). Pada gambar 2.16 (b) diperlihatkan photodiode dan rangkaian antarmukanya. Perlu diingat photodiode pada kondisi reverse biased sehingga arus kebocoran balik yang kecil harus dikonversikan menjadi tegangan penguatan oleh Operational Amplifier (Op-Amp).

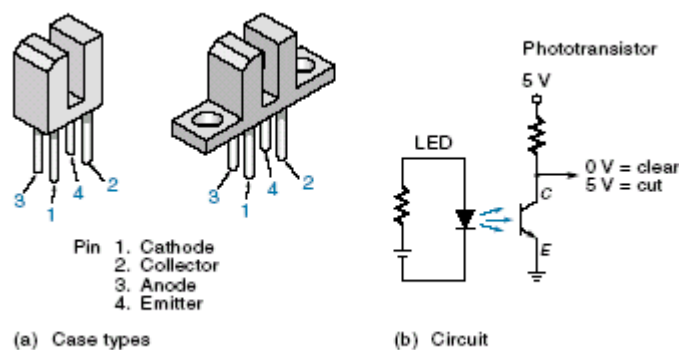


Gambar 2.16. Photodetector

Sebuah phototransistor (Gambar 2.16 c) tidak menggunakan basis. Cahaya secara efektif menghasilkan arus basis dengan membangkitkan pasangan elektron-hole di dalam sambungan Colector-Basis. Semakin banyak cahaya yang mengenai semakin menyala transistor.

Photovoltaic cell berbeda dengan sensor cahaya yang telah dibicarakan sejauh ini karena photovoltaic cell membangkitkan daya listrik dari cahaya. Semakin banyak cahaya yang mengenainya semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Sebuah sel surya adalah sebuah photovoltaic cell). Saat digunakan sebagai sensor, tegangankeluaran yang kecil biasanya dikuatkan sepertiyang terlihat pada gambar 2.16 (d).

Beberapa aplikasi optical proximity sensor yang disebut slotted coupler atau disebut optointerrupt (Gambar 2.17). Jenis ini didalamnya sudah termasuk sumber cahaya dan detektor dalam satu kemasan. Saat sebuah benda bergerak menuju slot, lintasan cahaya terputus. Jenis ini terdiri dari berbagai variasi rumah-rumahan (housing) [Gambar 2.17 (a)]. Untuk mengoperasikannya, daya harus diberikan pada LED dan sinyal keluaran berupa cahaya diterima oleh phototransistor. Pengerjaan ini dilakukan oleh rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 (b), rangkaian ini menyediakan keluaran level TTL (5 V atau 0 V). Saat slot terbuka berkas cahaya mengenai transistor menyalakannya phototransistor yang ter-ground pada collector. Saat berkas terhalangi transistor mati dan collector tertarik sampai 5V oleh resistor.

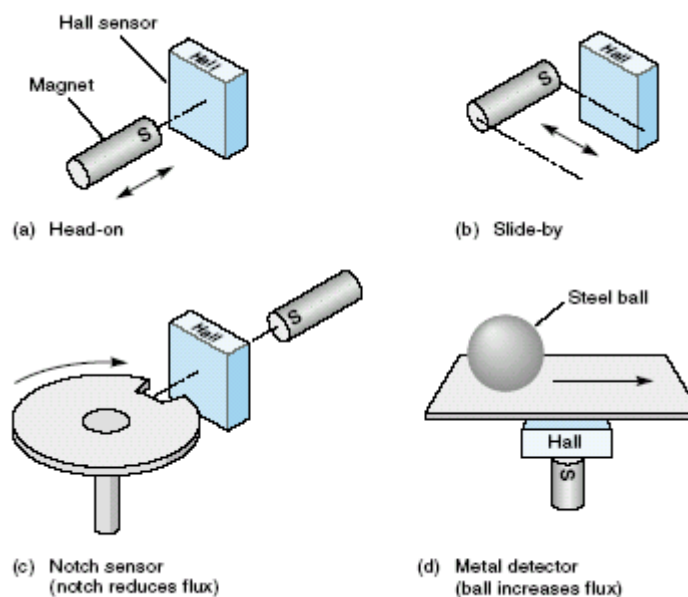


Gambar 2.17. Contoh Optical Slotted

Sensor optik memiliki keuntungan yaitu baik sumber cahaya, obyek yang akan dideteksi dan detektor tidak harus berdekatan. Sebagai contoh sistem anti maling. Sumber cahaya ditempatkan pada satu sisi ruangan, pencuri berada ditengah-tengah dan detektor berada di sisi yang lain. Sifat ini menjadi penting saat tidak ada permukaan pemasangan yang cukup dekat dengan bagian yang diukur. Di sisi lain tetap menjaga lensa bersih merupakan masalah dalam kondisi pembuatan.

Hall-Effect Proximity Sensor

Pada tahun 1979 E.H Hall pertama kali mengemukakan suatu efek atas namanya. Ia menemukan sifat khusus dari tembaga yang kemudian disebut semikonduktor: Tembaga menghasilkan tegangan saat berada pada medan magnetic. Pernyataan ini berlaku untuk jenis germanium dan indium. Efek Hall mula-mula digunakan untuk watt meter dan gauss meter, sekarang digunakan secara luas untuk sensor jarak (proximity sensor). Gambar 2.18 memperlihatkan jenis-jenis aplikasinya. Pada setiap aplikasi ini Hall-Effect sensor mengeluarkan tegangan saat medan magnetic meningkat. Peningkatan medan magnetic ini terjadi dengan menggerakkan sebuah magnet atau mengubah lintasan medan magnetic (tetapi besar tegangan hall tidak tergantung pada pergerakan medan magnetik hanya bergantung akan keberadaannya saja)



Gambar 2.18 Jenis-jenis aplikasi Hall-Effect Sensor

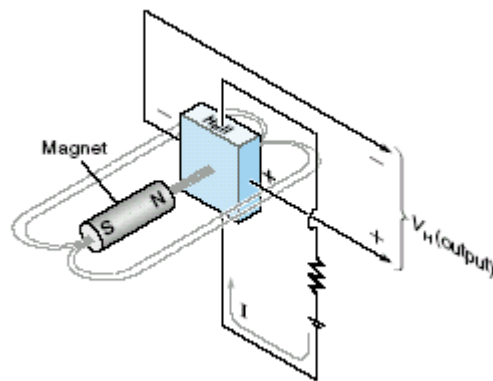
Gambar 2.19 memperlihatkan bagaimana Efek Hall bekerja. Mula-mula sebuah sumber tegangan luar digunakan untuk membangkitkan arus (I) di dalam kristal semikonduktor. Tegangan keluaran (V_H) diindera oleh sisi-sisi kristal, tegangan ini tegak lurus dengan arah arus. Saat medan magnetik didekatkan, muatan negative dideflesikan ke satu sisi dan menghasilkan tegangan. Hubungan tengeran dan arus ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$V_H = \frac{KIB}{D}$$

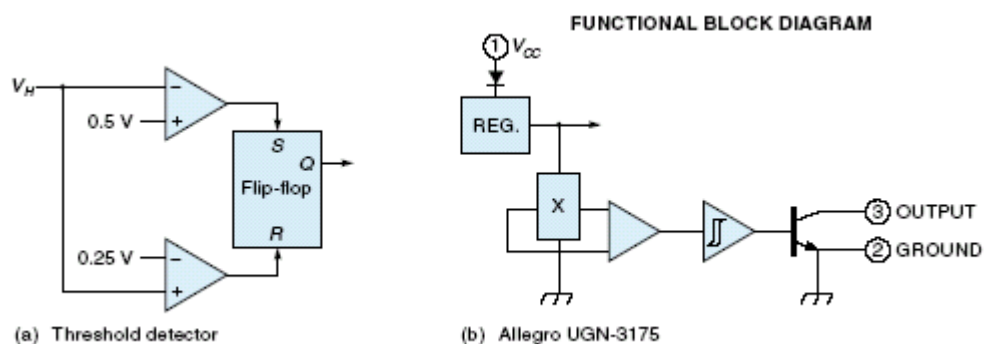
dengan

- V_H = Tegangan efek Hall
- K = Konstanta (tergantung pada bahannya)
- I = arus dari sumber tegangan luar
- B = Kerapatan fluks magnetik

D = Konstanta ketebalan



Gambar 2.19 Cara kerja Hall-Effect Sensor



Gambar 2.20 Rangkaian antarmuka Hall-Effect

Dari persamaan terlihat V_H berbanding lurus dengan I dan B . Jika I dipertahankan konstan maka V_H berbanding lurus dengan B (kerapatan fluks magnetik). Sehingga keluarannya tidak benar-benar on/off (untuk jarak yang dekat) tetapi linier. Untuk memperoleh aksi penskalaran keluaran harus dilewatkan pada detector ambang (threshold) seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.20 (a). Rangkaian ini menggunakan dua amplifer komparator untuk menetapkan tegangan pensaklaran high dan low. Saat V_H diatas 0,5 V, amplifer atas mengeset R-S flip-flop. Saat V_H turun dibawah 0,25 V amplifer dasar me-reset flip-flop. Untuk membuat rangkaian ini bekerja kita perlu memastikan bahwa magnet cukup dengan terhadap sensor untuk membuat V_H naik di atas 0,5 V dan cukup jauh untuk membuat V_H turun di bawah 0,25 V.

Saklar Efek Hall secara lengkap didapati dalam bentuk IC. Salah satu contohnya adalah Allegro 3175 (Gambar 3.20 (b)). Di dalam IC ini terdapat sensor (C), penggerak arus-melintang dan detektor ambang. Transistor menyala saat medan magnetik di atas + 100 gauss dan akan mati saat medan turun di bawah -100 gauss. Transistor dapat menghasilkan 15 mA yang mampu menggerakkan relay kecil secara langsung atau sebuah rangkaian digital TTL. Hall-effect sensor digunakan di banyak aplikasi contohnya pensaklaran keyboard computer, sensor jarak pada mesin. Disamping itu juga digunakan sebagai sensor pada tachometer rotor bergerigi (toothed-rotor tachometer) seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

2.5. Sensor Temperatur

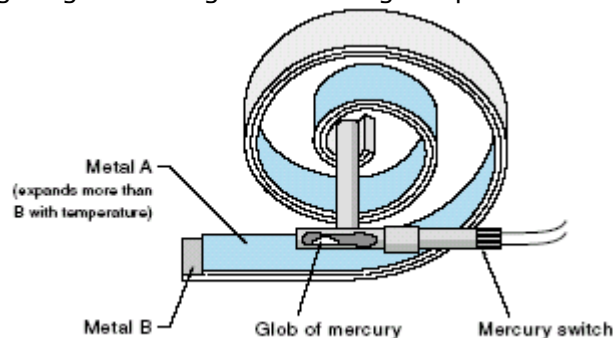
Sensor temperatur memberikan keluaran yang sebanding dengan temperatur. Kebanyakan sensor temperatur memiliki koefisien temperatur positif (yang diinginkan) artinya keluaran sensor naik saat temperatur yang diindera naik tetapi beberapa sensor memiliki koefisien temperatur negatif yaitu keluarannya akan turun saat temperatur naik.

Banyak sistem kontrol memerlukan sensor temperatur hanya untuk mengkompensasi pengaruh temperatur pada suatu sensor lain yang keluarannya terganggu dengan adanya temperatur.

Sensor Temperatur Bimetal

Sensor ini terdiri dari lempeng bimetal yang dipuntir menjadi spiral (Gambar 2.21). Lempeng bimetal adalah gabungan dua logam tipis dengan koefisien muai yang berbeda. Saat temperatur naik logam di sisi dalam akan memuai lebih dari logam di sisi luar dan spiral cenderung untuk meregang. Sensor ini biasanya digunakan untuk kontrol on-off misalnya termostat.

Switch mercury bergerak dari on dan off, saat temperatur meningkat tabung yang berisi cairan merkuri berotasi searah jaruh jam. Saat tabung berputar melewati horisontal, merkuri bergerak ke bawah dan membuat koneksi elektrik antar elektroda. Salah satu keuntungan dari sistem ini adalah keluaran dari switch dapat digunakan langsung tanpa perlu pengkondisi sinyal. Saat ini switch (saklar) mercury sudah tidak digunakan karena alasan keamanan lingkungan dan digantikan dengan tipe switch kontak yang lain.



Gambar 2.21 Sensor Bimetal mengatur switch mercury (gambar ini pada keadaan dingin)

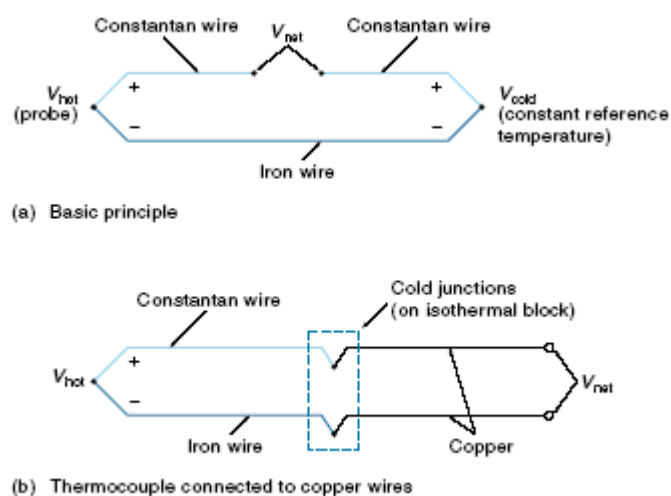
Termokopel (thermocouples)

Termokopel telah dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu dan masih banyak dipergunakan sampai sekarang, khususnya pada pengukuran temperatur tinggi. Termokopel didasari pada efek Seebeck, yaitu suatu fenomena sebuah tegangan listrik yang sebanding dengan temperatur. Tegangan listrik ini dihasilkan dari rangkaian yang terdiri dari dua kawat logam berbeda. Sebagai contoh termokopel terbuat dari besi dan constantan (sejenis paduan logam) menghasilkan tegangan listrik kira-kira $35 \mu\text{V}/^\circ\text{F}$. Gambar 2.22 memperlihatkan kondisi ini. Sambungan (*junction*) pada setiap ujung dari kedua logam berbeda ini menghasilkan tegangan listrik, Jadi tegangan bersih (V_{net}) dapat dihitung dengan menyelisihkan antara tegangan sambungan. Sambungan pada probe disebut sambungan panas. Sedangkan sambungan yang lain disebut sambungan dingin atau sambungan referensi. Tegangan keluaran dari sistem ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{\text{net}} = V_{\text{panas}} - V_{\text{dingin}}$$

Secara praktis kabel termokopel dikoneksikan dengan kabel tembaga seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.22 (b). sehingga sekarang terdiri dari tiga sambungan. Meskipun demikian, tegangan total dari kedua sambungan tembaga akan tetap sama dengan sebuah sambungan dingin (V_{dingin}) seperti pada gambar 2.22 (a). (Asumsikan bahwa sambungan tembaga sama pada temperatur yang sama) sehingga analisisnya tidak berubah.

Secara tradisional sambungan dingin dipertahankan pada temperatur 32°F dalam sebuah wadah air es (ice water bath) yang berisi air dan es. Air es digunakan karena menghasilkan temperatur yang diketahui juga V_{dingin} menjadi konstan pada persamaan di atas sehingga persamaan itu hanya ditentukan oleh V_{panas} dan V_{net} saja.



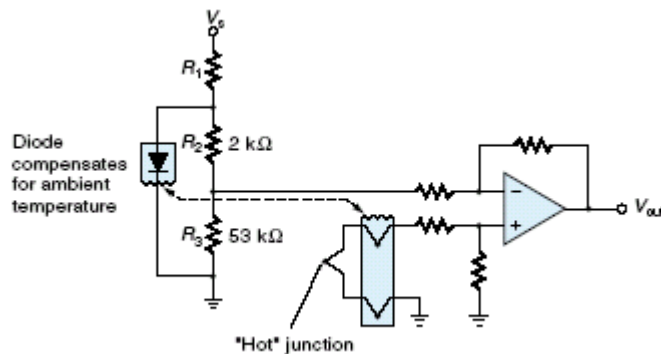
Gambar 2.22 Rangkaian Termokopel (tipe Iron-Constantan)

Pada sistem modern air es dihilangkan dan digantikan dengan semikonduktor sebagai temperatur referensi. Sambungan dingin memerlukan temperatur yang konstan sebagai temperatur referensi terutama pada sistem yang menggunakan banyak termokopel dan mengacu pada temperatur referensi yang sama.

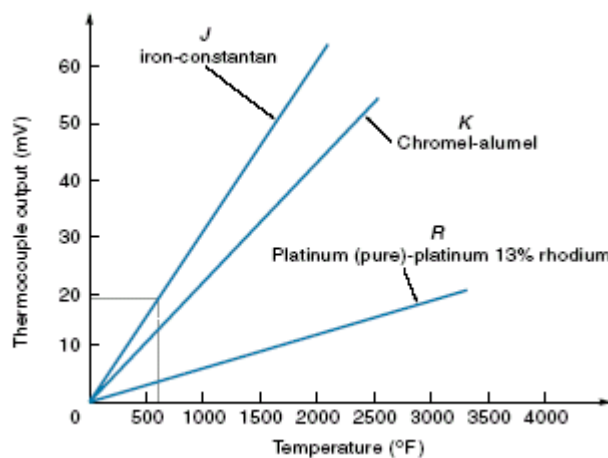
Metoda yang lain adalah dengan menggunakan cara mencocokkan tabel nilai dari V_{dingin} untuk setiap temperatur ambien (temperatur ruang) dan menambahkan nilai ini pada V_{net} untuk menghasilkan V_{panas} . Cara ini biasanya menggunakan komputer.

Cara lain untuk menghilangkan bak air es adalah dengan menggunakan dioda yang sensitif terhadap panas. Rangkaian dioda ini membuat keluaran termokopel berperilaku seolah-olah sambungan dingin tetap beku meskipun sebenarnya tidak. Gambar 2.23. memperlihatkan rangkaian untuk termokopel iron-constantan. Sambungan dingin dibuat bertemperatur yang sama dengan temperatur dioda dengan memasang sambungan dingin ini pada kotak isothermal. Saat temperatur ambien naik tegangan maju (forward voltage) turun (sekitar 0,6 V) dengan laju 1,1 mV/°F. Tegangan ini diskalakan dengan R2 dan R3 menjadi 28μV/°F sama dengan laju dari tegangan asli sambungan dingin saat naik karena temperatur ambien.

Menggunakan Op-Amp untuk mengurangi pengaruh temperatur ambien pada perubahan sambungan dingin kita dapat sebuah tegangan termokopel yang berbanding lurus dengan temperatur. Termokopel komersial tersedia dengan berbagai rentang temperatur dan sensitivitas (sensitivitas diukur dalam volts/derajat). Gambar 2.24 memperlihatkan kurva tegangan terhadap temperatur dari kelas-kelas besar termokopel. Seperti yang anda lihat tipe J (iron-constantan) memiliki sensitivitas yang tinggi tetapi memiliki rentang temperatur yang rendah, tipe K (chromel-alumel) memiliki rentang temperatur yang lebih tinggi tetapi sensitivitasnya rendah, dan tipe R (platinum-rhodium) memiliki sensitivitas yang jauh lebih rendah tetapi dapat bekerja pada temperatur yang sangat tinggi.



Gambar 2.23 Sebuah dioda yang digunakan untuk mengkompensasi tegangan sambungan dingin (cold-junction)



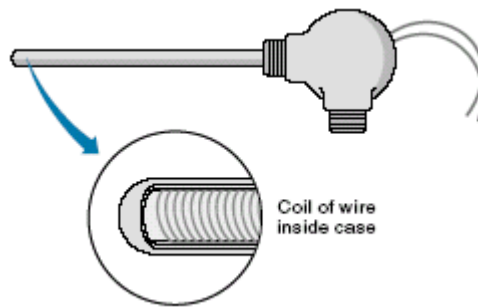
Gambar 2.24 Keluaran Termokopel untuk berbagai tipe kawat yang berbeda. Temperatur referensi pada 32°F

Termokopel sangat sederhana dan mudah dipasang tetapi memerlukan peralatan elektronika tambahan yang memiliki sensitivitas rendah dan tidak bermasalah dengan sambungan dingin. Tapi kelebihan termokopel linier (pada batasan tertentu), handal, stabil dan dapat digunakan pada temperatur tinggi seperti pada tungku dan oven.

RTD (Resistance Temperatur Detector)

RTD adalah sensor temperatur yang didasarkan pada kenyataan bahwa logam akan meningkat tahanannya saat temperatur naik. Gambar 2.25 memperlihatkan tipe dari RTD. Sebuah kawat terbuat dari platinum dibungkus oleh keramik atau batang gelas. (kadang-kadang lilitan kawat dipasang diantara kedua batang keramik). Kawat platinum memiliki koefisien temperatur $0,0039 \Omega/^\circ\text{C}$ yang artinya tahanannya akan naik $0,0039 \Omega$ untuk

setiap kenaikan satu derajat celcius. RTD tersedia pada beberapa tahanan yang berbeda tapi biasanya 100 Ω . Sehingga 100 Ω RTD platinum memiliki tahanan 100 Ω pada 0°C



Gambar 2.25 Resistance Temperature Detector

Thermistor

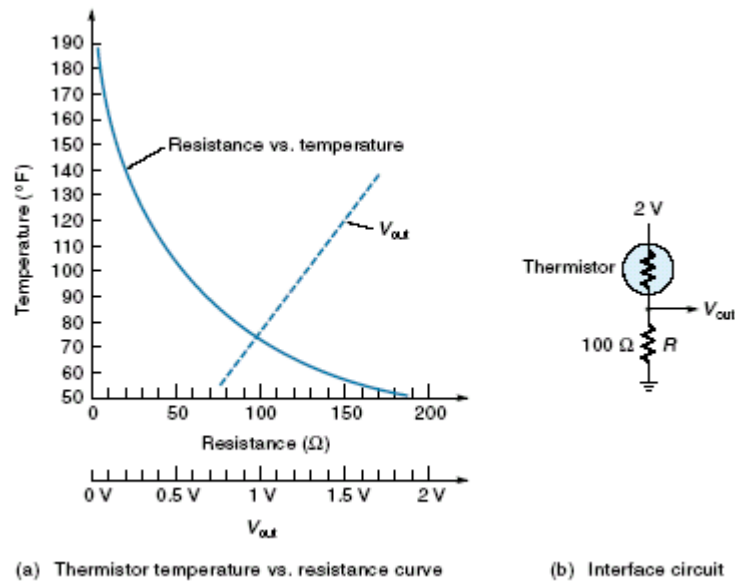
Termistor adalah peralatan dengan dua terminal yang tahananannya akan berubah terhadap perubahan temperatur. Termistor terbuat dari bahan semikonduktor dan memiliki banyak variasi ukuran dan bentuk. Termistor bersifat non linier sehingga jarang digunakan untuk memperoleh pembacaan temperatur yang akurat tetapi hanya digunakan untuk mengindikasikan perubahan temperatur misalnya saat ada pemanasan berlebih (overheating). Selain itu semua termistor memiliki koefisien temperatur negatif yang berarti tahananannya akan turun saat temperatur meningkat seperti yang diperlihatkan sebagai garis tebal pada gambar 2.26 (a). Salah satu sifat yang diinginkan dari termistor adalah sensitivitasnya tinggi. Perubahan temperatur yang relatif kecil dapat menghasilkan perubahan tahanan termistor yang besar.

Pada gambar 2.26 (b) diperlihatkan sebuah rangkaian antarmuka termistor sederhana. Dengan menempatkan termistor pada bagian atas dari pembagi tegangan (voltage divider), menghasilkan tegangan keluaran yang relatif linier dan memiliki kemiringan positif (diperlihatkan sebagai garis putus-putus pada gambar 2.26 (b)). Nilai resistor (R) dipilih dekat dengan nilai nominal dari termistor.

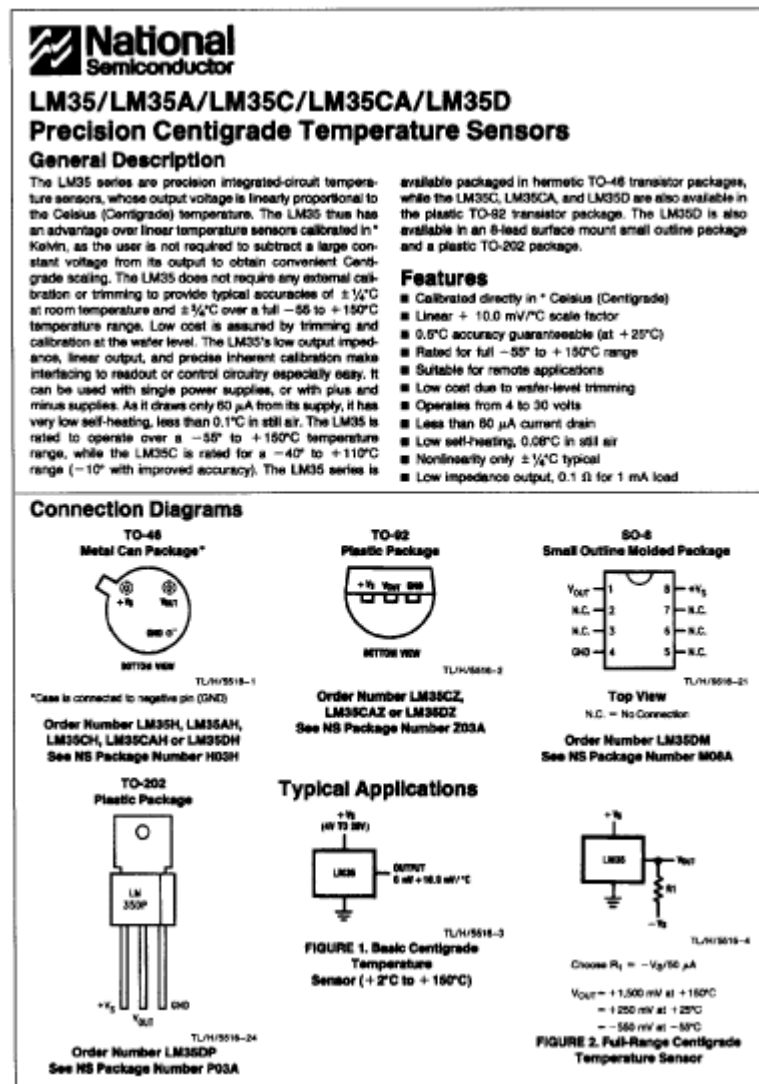
Termistor memiliki rentang tahanan yang luas mulai dari beberapa ohm sampai 1 $M\Omega$, pemilihannya tergantung dari rentang temperatur yang diinginkan. Model dengan tahanan tinggi digunakan untuk temperatur tinggi, untuk meningkatkan sensitivitas dan untuk menjaga sensor mengambil arus terlalu besar.

Integrated Circuit Temperatur Sensors

IC sensor memiliki beberapa konfigurasi. Contoh yang paling sering adalah seri LM34 dan LM35. LM34 menghasilkan tegangan keluaran sebanding dengan temperatur Fahrenheit sedangkan LM35 menghasilkan keluaran yang sebanding dengan temperatur celcius. Gambar 2.27 memperlihatkan lembar spesifikasi (spec) untuk LM35. IC ini terdiri dari tiga terminal aktif yaitu tegangan suplai (V_S), ground dan V_{out} . Tegangan keluaran LM35 berbanding lurus dengan derajat celcius yaitu $V_{out} = 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$



Gambar 2.26 Thermistor



Gambar 2.27 Sensor temperatur LM35

Bab III

Operational Amplifier

3.1. Masalah Interfacing

Interfacing sebagai cara untuk menggabungkan antara setiap komponen sensor dengan pengontrol. Dalam diagram blok terlihat hanya berupa garis saja diantara kotak, tetapi pada kenyataannya sangat sukar untuk menyambungkan suatu sensor dengan pengontrol. Misalnya suatu sensor bekerja secara analog sedangkan pengontrol hampir sebagian besar adalah digital sehingga perlu interfacing dari analog ke digital. Masalah yang terjadi adalah resolusi alat, waktu konversi ke digital dan tegangan. Selain itu masalah lain adalah penyamaan tegangan (voltage matching), sensor menghasilkan tegangan keluaran antara 0 – 5 V sedangkan pengkondisi sinyal atau pengontrol mensyaratkan tegangan antara 0 – 10 V sehingga perlu interfacing sebagai penyesuai. Masalah lain adalah sensor tidak linier sehingga keluaran sensor tidak berbanding lurus dengan besaran yang diukur.

Beberapa kondisi mensyaratkan sinyal keluaran yang dihasilkan sensor tidak boleh ada yang hilang padahal setiap kabel memiliki tahanan listrik yang akan menyebabkan rugi-rugi daya. Masalah lain adalah alat listrik termasuk sensor tidak terlepas dari pengaruh gangguan berupa noise, sehingga perlu adanya interfacing yang dapat mengurangi pengaruh noise tersebut.

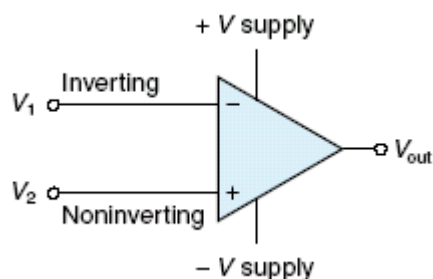
3.2. Operational Amplifier (Op-Amp)

Operational Amplifier adalah penguat linier yang biasanya dikemas di dalam suatu IC (Integrated Circuit). Satu IC bisa berisi satu atau empat Op-Amp biasanya. Operational amplifier merupakan penguat analog yang cukup baik karena memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Memiliki gain open loop yang sangat tinggi : $A = 100.000$
2. Tahanan input yang sangat tinggi : $R_{in} > 1 \text{ M}\Omega$
3. Tahanan output yang sangat rendah : $R_{out} = 50 - 70 \text{ ohm}$

Karakteristik ini memudahkan perancangan misalnya kita dapat membuat penguat dengan gain open loop yang tinggi dan stabil antara 1 sampai 1000 atau lebih. Sedangkan keuntungan dari tahanan input yang sangat tinggi adalah Op-Amp menyita arus yang sangat kecil sehingga tidak membebani rangkaian yang dihubungkan ke input Op-Amp. Sedangkan tahanan output yang besar berarti Op-Amp dapat menggerakkan beban tanpa terbebani.

Tapi Op-amp adalah penguat sinyal bukan penguat daya sehingga tidak dapat langsung dihubungkan ke beban dengan arus yang besar seperti loudspeaker atau motor secara langsung.



Gambar 3.1.

Gambar 3.1. memperlihatkan simbol dari Op-amp yang terdiri dari dua tegangan input (V_1 dan V_2) serta satu tegangan output (V_{out}). Selain itu diperlihatkan juga dua daya masukan (V_{supply}). Pada Op-amp tidak ada

ground. Tegangan output dapat berkisar sampai 80% dari tegangan input. Hampir semua Op-Amp adalah penguat diffrensial artinya keluaranya merupakan perkalian dari selisih tegangan input seperti yang dituliskan pada persamaan di bawah ini

$$V_{out} = A (V_2 - V_1)$$

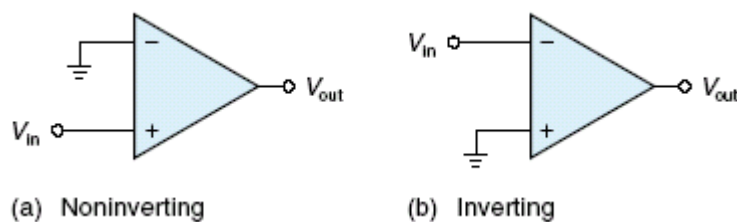
A adalah gain open loop

V_1 = inverting input

V_2 = non inverting input

Gain open loop adalah gain (penguat) dari Op-Amp sebelum dihubungkan dengan rangkaian tambahan besarnya sekitar 100.000 atau lebih. Sedangkan non inverting input adalah tegangan input yang sefasa dengan keluaran. Jika non inverting input positif maka keluaran akan menjadi positif. Sebaliknya terjadi pada inverting input. Tetapi secara serempak input dari Op-Amp hanya satu tegangan yaitu selisih dari V_1 - V_2 pada persamaan tadi.

Bisa juga memang kalau kita ingin memasang satu input saja pada Op-Amp, misalnya bila kita menginginkan output dari Op-Amp sefasa dengan input maka kita dapat menghubungkan Input non inverting dengan tegangan input (V_{in}) dan input non inverting dengan ground (Gambar 3.2a). Jika ingin outputnya berlawanan fasa yaitu saat input negatif maka outputnya positif maka dapat dilakukan cara pada gambar 3.2 b

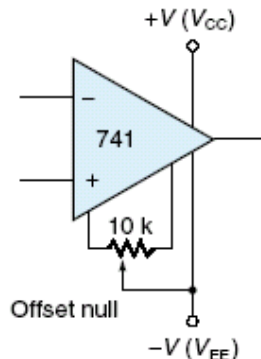


Gambar 3.2 Input tunggal

Banyak jenis Op-Amp yang ada dipasaran misalnya jenis general purpose, wide-bandwidth, low noise dan high frequency. Tapi untuk kontrol biasanya penguat sinyal cukup menggunakan Op-Amp 741 (MC741) seperti yang diperlihatkan pada datasheet di gambar 3.3. Disamping pin untuk tegangan input dan tegangan output terdapat juga dua pin yang disebut offset null, kegunaan dari offset nul ini adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 adalah untuk mengatur tegangan output naik atau turun agar bisa menghilangkan tegangan offset DC. Tegangan offset DC adalah tegangan kecil DC yang terjadi pada tegangan output saat selisih tegangan input nol. Seharusnya tegangan output juga nol, maka offset null ini digunakan untuk menolak tegangan output.

Kalau melihat datasheet pada gambar 3.3. tertulis gain voltage adalah 50-200 V/mV. Ini berarti bila input yang masuk 1 mV maka keluaran dari Op-Amp sebesar 50V atau sebesar penguatan 50.000. Op-Amp 741 merupakan Op-Amp versi lama yang masih dipakai di laboratorium, sekarang ini sudah banyak tipe-tipe lain yang lebih canggih dan lebih baru misalnya LF355, LM308, LF411. LF411 memiliki tegangan input yang sangat tinggi dan tanpa tegangan offset. Hampir semua pengkondisi sinyal dapat dibuat dari Op-Amp. Beberapa pengkondisi sinyal akan dibahas pada bab ini

Data sheet for the 741 general-purpose op-amp. (Copyright © Semiconductor Components Industries, LLC. Used by permission.)



MC1741

INTERNALLY COMPENSATED, HIGH PERFORMANCE OPERATIONAL AMPLIFIERS

... designed for use as a summing amplifier, integrator, or amplifier with operating characteristics as a function of the external feedback components.

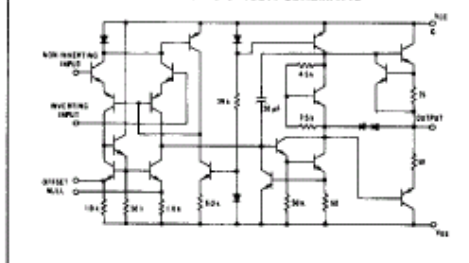
- No Frequency Compensation Required
- Short-Circuit Protection
- Offset Voltage Null Capability
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low-Power Consumption
- No Latch Up
- Low Noise Selections Offered - N Suffix

MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	MC1741C	MC1741	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	+18	+22	Vdc
	V_{EE}	-18	-22	Vdc
Input Differential Voltage	V_{ID}	± 30		Volts
Input Common-Mode Voltage (Note 1)	V_{ICM}	± 15		Volts
Output Short-Circuit Duration (Note 2)	t_{SC}	Continuous		
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +75	-55 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150		$^\circ\text{C}$
		-55 to +125		
Junction Temperature Range	T_J	175		$^\circ\text{C}$
		150		

Note 1: For supply voltages less than $\pm 15\text{ V}$, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
Note 2: Supply voltage equal to or less than 15 V .

EQUIVALENT CIRCUIT SCHEMATIC



ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +15\text{ V}$, $V_{EE} = -15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

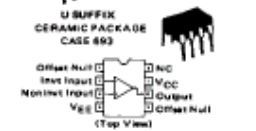
Characteristic	Symbol	MC1741			MC1741C			Unit
Input Offset Voltage ($R_G \leq 10\text{ k}$)	V_{IO}	—	1.0	5.0	—	2.0	6.5	mV
Input Offset Current	I_{IO}	—	20	200	—	20	200	nA
Input Bias Current	I_{IB}	—	80	500	—	80	500	nA
Input Resistance	r_i	0.3	2.0	—	0.3	2.0	—	M Ω
Input Capacitance	C_i	—	1.4	—	—	1.4	—	pF
Offset Voltage Adjustment Range	V_{IOB}	—	± 15	—	—	± 15	—	mV
Common Mode Input Voltage Range	V_{ICR}	± 12	± 13	—	± 12	± 13	—	V
Large Signal Voltage Gain ($V_O = \pm 10\text{ V}$, $R_L \geq 2.0\text{ k}$)	A_v	60	200	—	30	200	—	V/mV
Output Resistance	r_o	—	75	—	—	75	—	Ω
Common Mode Rejection Ratio ($R_G \leq 10\text{ k}$)	CMRR	70	90	—	70	90	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio ($R_G \leq 10\text{ k}$)	PSRR	—	30	150	—	30	150	$\mu\text{V/V}$
Output Voltage Swing ($R_L \geq 10\text{ k}$, $R_L \geq 2\text{ k}$)	V_O	± 12 ± 10	± 14 ± 13	—	± 12 ± 10	± 14 ± 13	—	V
Output Short-Circuit Current	I_{OS}	—	20	—	—	20	—	mA
Supply Current	I_Q	—	1.7	2.8	—	1.7	2.8	mA
Power Consumption	P_C	—	50	85	—	50	85	mW
Transient Response (Unity Gain - Non-Inverting)								
($V_i = 20\text{ mV}$, $R_L \geq 2\text{ k}$, $C_L \leq 100\text{ pF}$) Rise Time	T_{rLH}	—	0.3	—	—	0.3	—	μs
($V_i = 20\text{ mV}$, $R_L \geq 2\text{ k}$, $C_L \leq 100\text{ pF}$) Overshoot	os	—	15	—	—	15	—	%
($V_i = 10\text{ V}$, $R_L \geq 2\text{ k}$, $C_L \leq 100\text{ pF}$) Slew Rate	SR	—	0.5	—	—	0.5	—	V/ μs

OPERATIONAL AMPLIFIER SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT

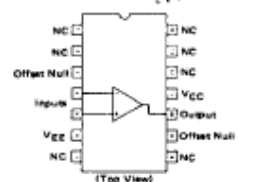
G SUFFIX METAL PACKAGE CASE 501



P1 SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 620 (MC1741C, MC1741NC)



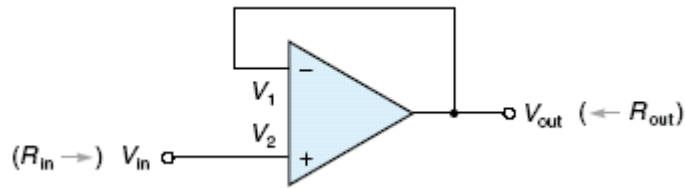
L SUFFIX CERAMIC PACKAGE CASE 622 TO-18



Gambar 3.3. Data Sheet Op-Amp 741

3.2.1. Voltage Follower (Pengikut Tegangan)

Rangkaian Voltage Follower berguna untuk meningkat arus tanpa mengubah tegangannya. Digunakan untuk mengubah sinyal berimpedansi tinggi (mudah terbebani) menjadi sinyal berimpedansi rendah (sukar terbebani) yang kokoh (robust). Gain tegangannya 1.



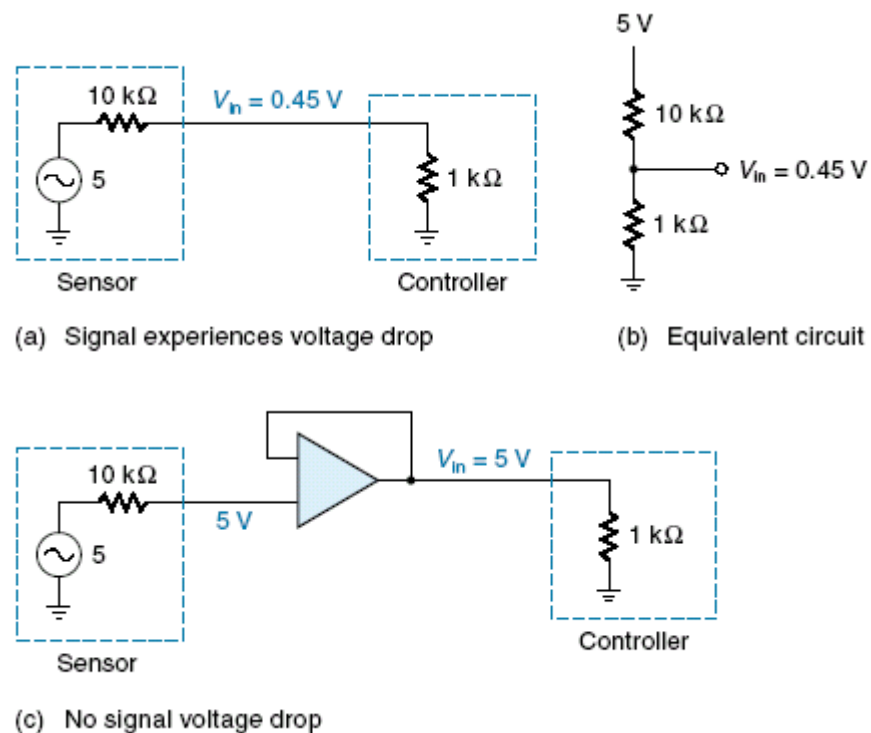
Gambar 3.4. Voltage Follower

R_{in} adalah tahanan yang sangat besar dan R_{out} adalah tahanan yang sangat kecil. Kembali ke persamaan awal saat V_{out} sama dengan V_1 maka persamaan awal menjadi :

$V_{out} = A(V_2 - V_{out})$ sehingga bila V_{out} yang dicari maka persamaan menjadi

$$V_{out} = \frac{AV_2}{1+A} \approx V_2$$

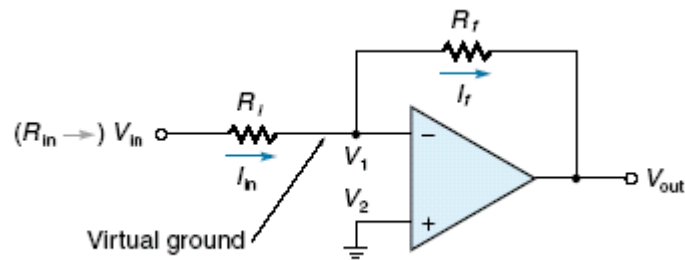
dengan V_2 adalah V_{in} jadi $V_{out} = V_{in}$. Gambar 3.5a memperlihatkan sensor yang mengalami beban turun saat dihubungkan dengan pengatur (controller) sehingga tegangan yang diterima pengatur lebih rendah. Sedangkan Gambar 3.5c memperlihatkan pemasangan voltage follower yang menyebabkan tidak adanya pembebanan turun.



Gambar 3.5. Pemasangan voltage follower untuk mencegah tegangan drop

3.2.2. Inverting Amplifier (Penguat Inverting)

Penguat inverting adalah penguat yang paling sering digunakan. Rangkaian hanya memerlukan dua tahanan yaitu R_i dan R_f . Saat tegangan input positif masuk hasilnya akan dikuatkan tetapi dengan fasa yang berbeda yaitu menjadi negatif.



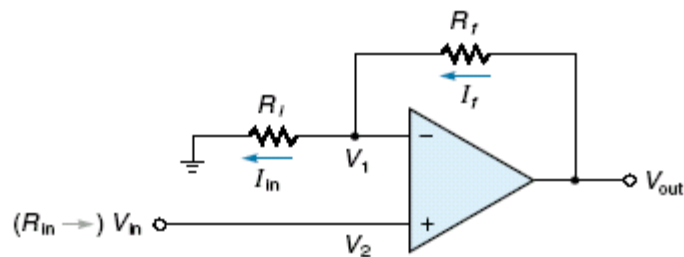
Gambar 3.6. Penguat Inverting

Semua arus I_{in} hanya melewati R_i dan I_{in} besarnya sama dengan I_f . Dengan hukum kirchoff dapat dicari persamaan tegangan keluaran sebagai berikut:

$$V_{out} = -(R_f/R_i) V_{in}$$

3.2.3. Non Inverting Amplifier (Penguat non inverting)

Penguat noninverting mirip dengan penguat inverting tetapi fasa dari tegangan input akan sama dengan fasa tegangan output. Biasanya penguat non inverting lebih sering dipakai saat dihubungkan dengan pengatur.



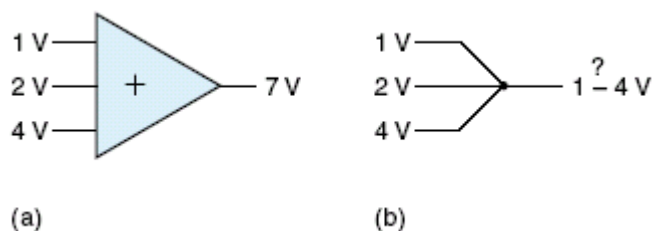
Gambar 3.7. Penguat Non inverting

Hubungan antara tegangan output dan tegangan input dinyatakan dengan persamaan ini

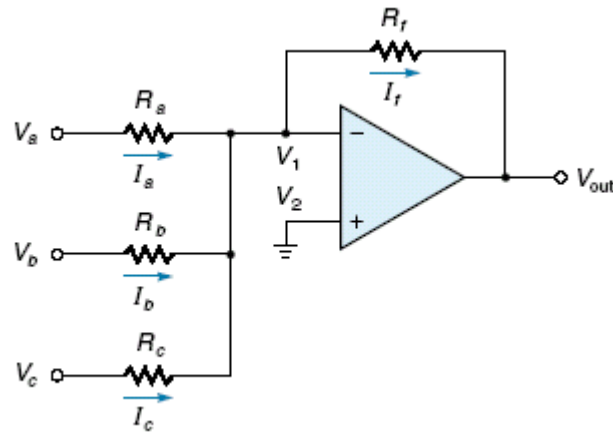
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f}{R_i} + 1$$

3.2.4. Summing Amplifier (Penjumlah)

Summing Amplifier digunakan sebagai penjumlah tegangan. Summing amplifier dapat digunakan untuk menjumlah tegangan dari beberapa sumber yang memiliki arus yang berbeda. Menjumlahkan ini tidak mudah, bila kita menghubungkan tiga kabel biasa dengan tegangan 1 V, 2 V dan 4 Volt Gambar 3.8.b hasilnya tidak 7 Volt karena tergantung dari kabel yang memiliki tahanan terkecil, mungkin antara 1 – 4 Volt



Gambar 3.8 ilustrasi penjumlahan tegangan

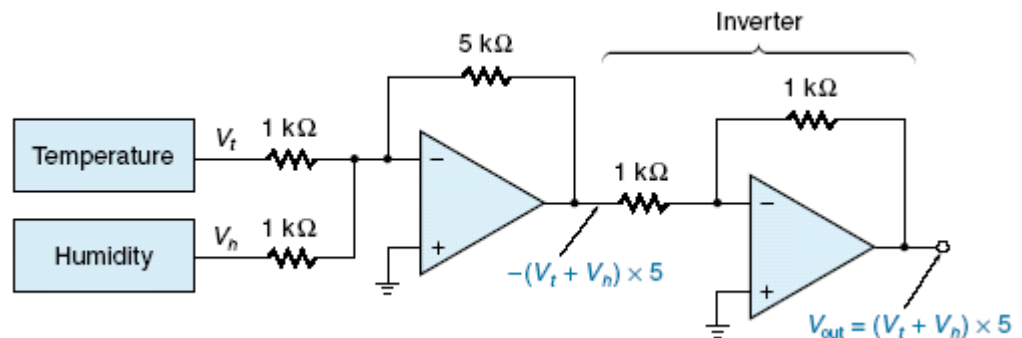


Gambar 3.9. Summing Amplifier

Persamaan tegangan keluaran ditentukan sebagai berikut:

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_a}V_a + \frac{R_f}{R_b}V_b + \frac{R_f}{R_c}V_c\right)$$

Misalkan sebuah air conditioning akan dinyalakan jika jumlah tegangan dari sensor temperatur dan kelembaban (humadity) lebih dari 1 V. Tetapi air conditioning memiliki batas tegangan minimum 5 Volt untuk meng-on kannya maka dibuat rangkaian yang terdiri dari summing amplifier dan penguat inverting seperti gambar di bawah ini (Gambar 3.10)



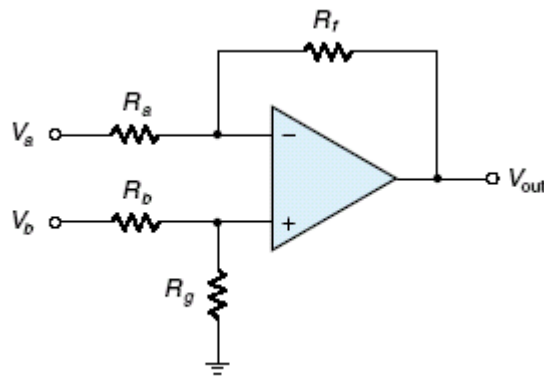
Gambar 3.10 Penyalan Air conditioning (AC) dengan bantuan summing amplifier dan penguat inverting

3.2.5. Differential Amplifier

Differential Amplifier merupakan amplifier yang digunakan untuk mencari selisih tegangan dari dua sinyal yang masuk. Persamaan tegangan outputnya dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_a} (V_b - V_a)$$

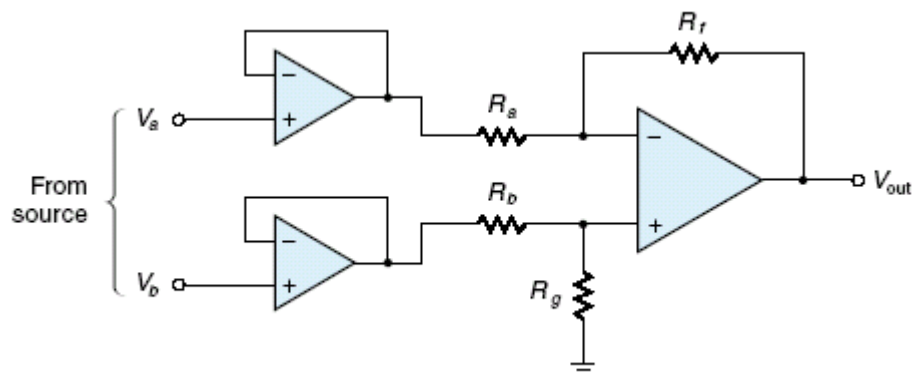
Tegangan Output merupakan tegangan tunggal yang mengacu pada ground biasanya disebut single-ended-voltage



Gambar 3.11. Differential Amplifier

3.2.6. Instrumentation Amplifier

Instrumentation Amplifier adalah jenis Differential Amplifier yang pada inputnya dihubungkan dengan sebuah voltage follower. Kegunaan dari voltage follower ini adalah : (1) meningkatkan tahanan input sehingga sumber (seperti sensor) tidak mengalami beban turun (2) membuat kedua tahanan input sama (3) Penguatan tidak ditentukan oleh tahanan dari sumber

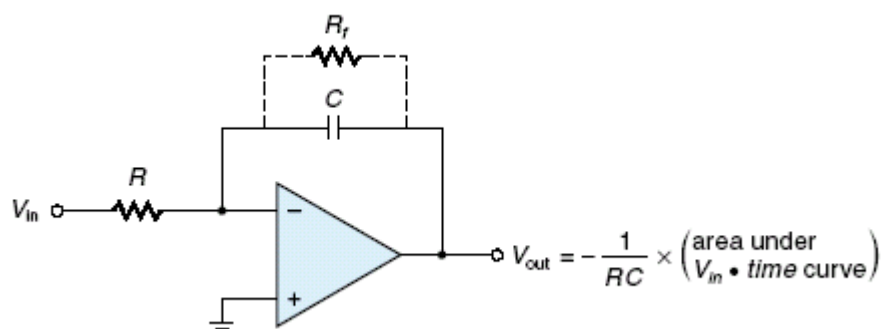


Gambar 3.12 Instrumentation Amplifier

Salah satu contoh adalah instrumentation amplifier dari Burr-Brown PGA204 yang gainnya dapat diatur menggunakan input digital, jenis ini disebut programmable gain instrumentation amplifier (Gambar 3.14)

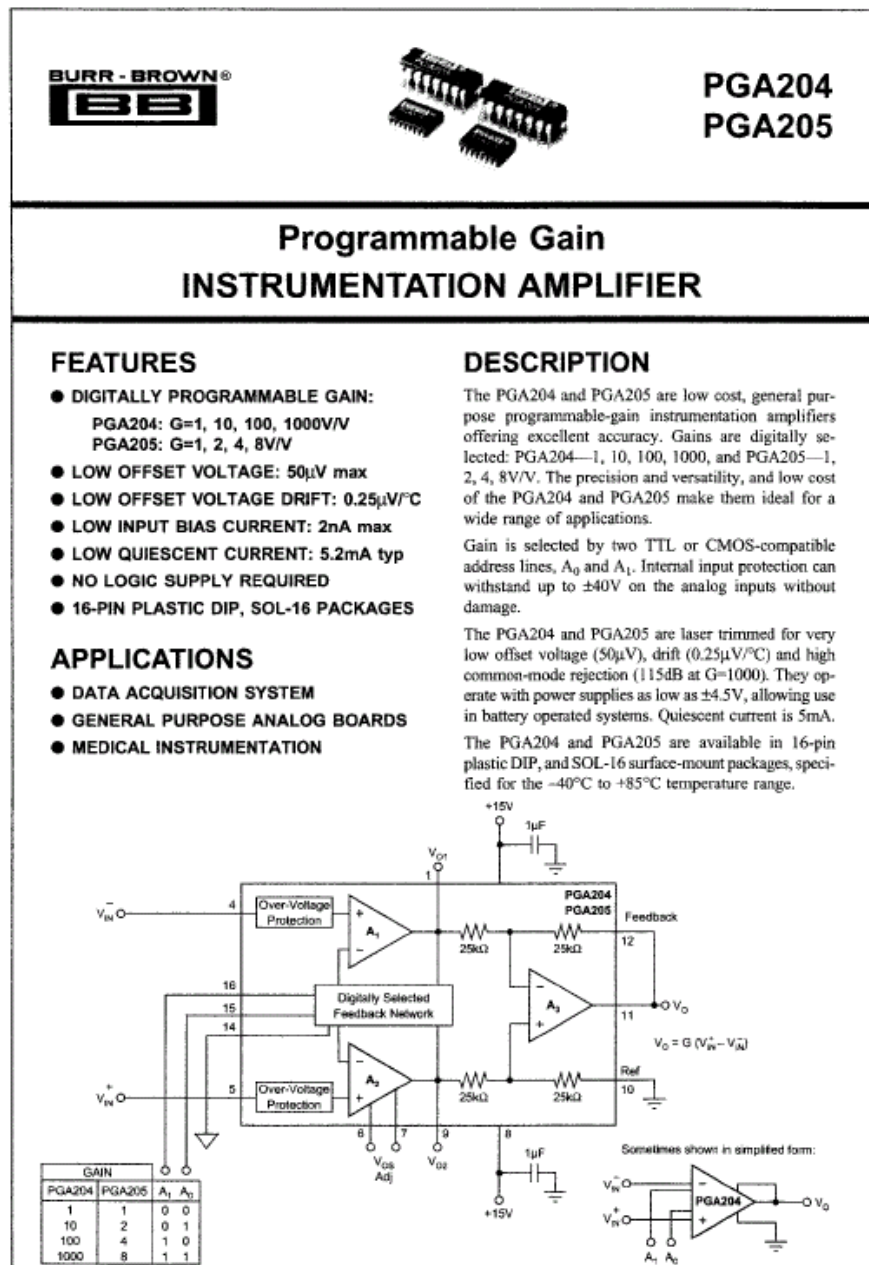
3.2.7. Integrator Amplifier dan Differentiator Amplifier

Op-Amp dapat digunakan sebagai integrator maupun sebagai differensiator dari suatu bentuk gelombang. Biasanya digunakan pada pengatur analog.



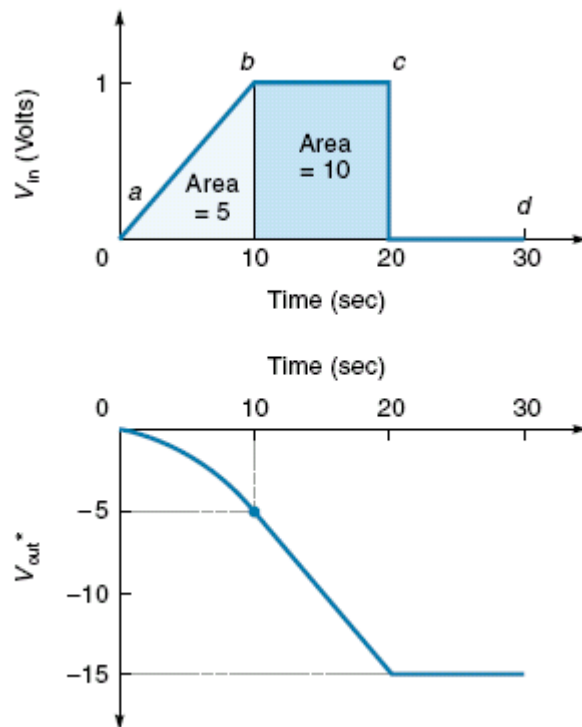
Gambar 3.13. Integrator Amplifier

Data sheet for the PGA204 instrumentation amplifier. (Courtesy of Burr-Brown Corp.)

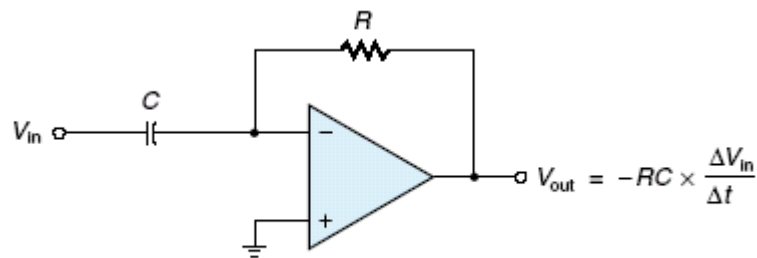


Gambar 3.14. Data Sheet Instrumentation Amplifier dari Burr-Brown PGA 204

Pada integrator amplifier tegangan outputnya berupa luas dari di bawah bentuk gelombang dari sinyal input seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.15. Sedangkan sebagai differensiator amplifier, tegangan output sebanding dengan laju dari perubahan (kemiringan) tegangan input



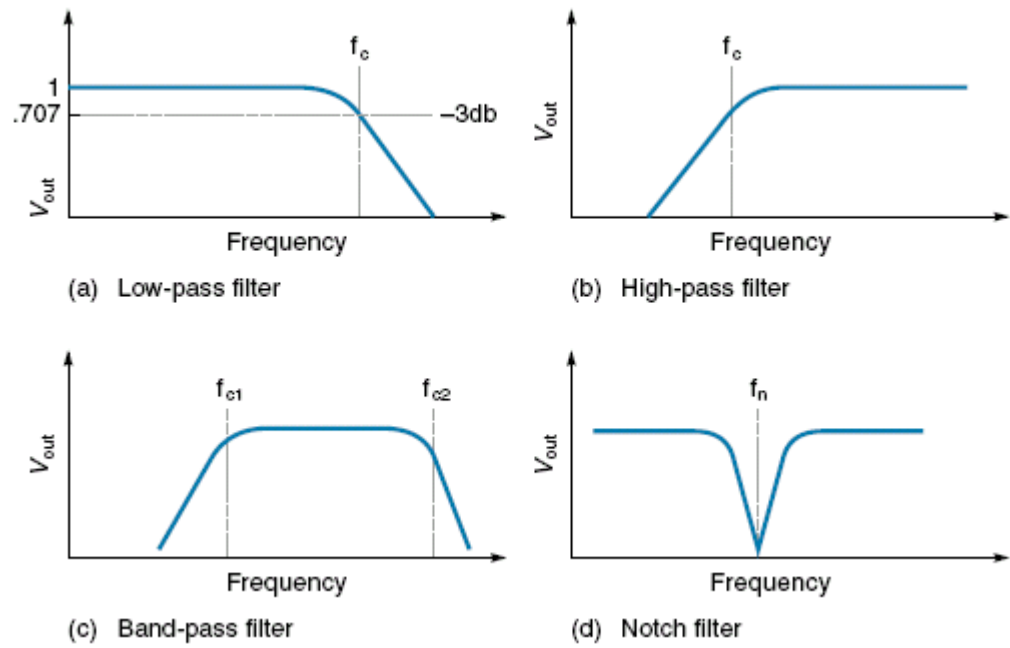
Gambar 3.15 Hasil keluaran dari integrator amplifier



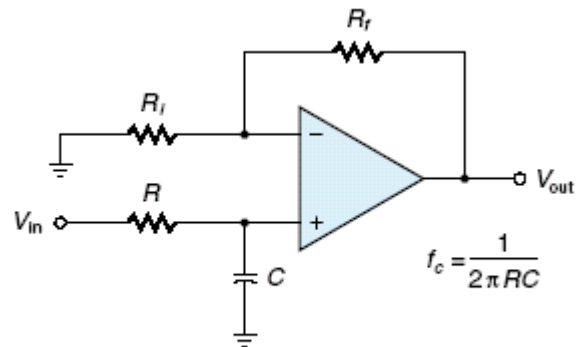
Gambar 3.16 Differentiator Amplifier

3.2.8. Filter Aktif

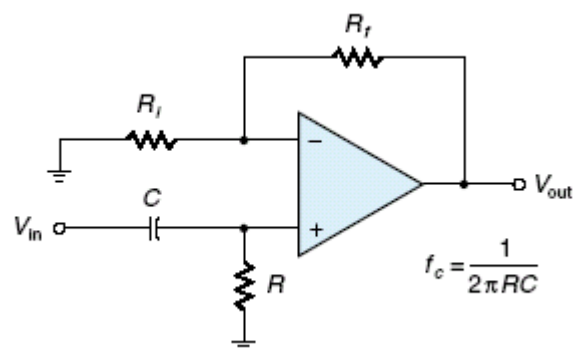
Filter aktif digunakan untuk melewati atau menstop suatu sinyal berdasarkan frekuensinya. Low Pass Filter akan melewati sinyal yang frekuensinya lebih rendah dari frekuensi cut off (f_c) dari filter tersebut, sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi cut off akan dilemahkan (atenuasi). Sedangkan high pass filter akan melewati semua sinyal yang frekuensinya di atas frekuensi cut off. Band pas filter akan melewati sinyal yang berada diantara dua frekuensi cut off (f_{c1} dan f_{c2}). Sedangkan notch filter akan menolak komponen sinyal yang berada pada frekuensi tertentu.



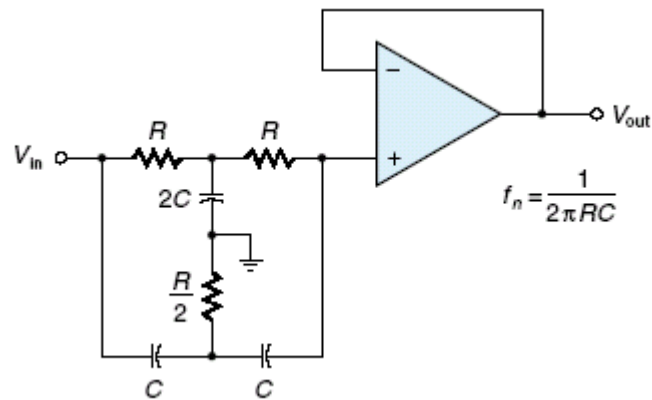
Gambar 3.17 Respon filter



Gambar 3.18 Rangkaian Low Pass Filter



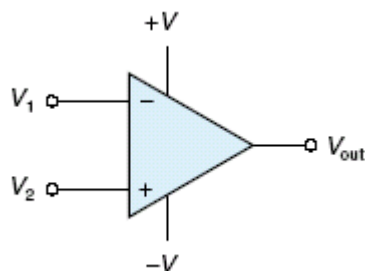
Gambar 3.19. Rangkaian High Pass Filter



Gambar 3.20 Notch Filter

3.2.9. Comparator

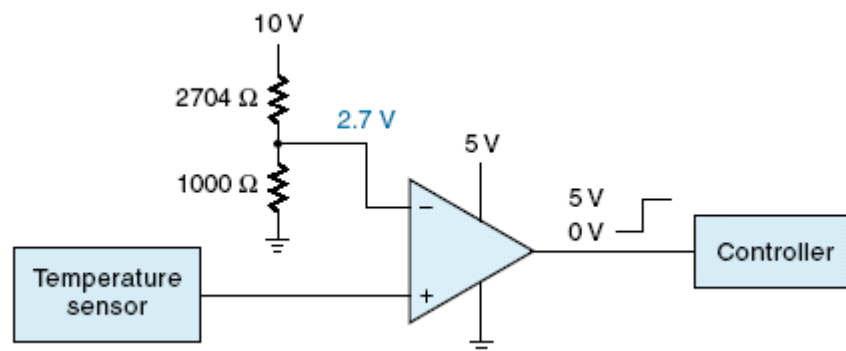
Komparator digunakan saat sinyal analog digunakan untuk memicu suatu kejadian. Beberapa interfacing membutuhkan rangkaian pendeteksi batas (threshold detector) dan akan menjadi on atau off saat tegangan input telah melewati batas yang ditentukan.. Komparator dapat menggunakan sebuah Op-Amp.



Gambar 3.21 Komparator

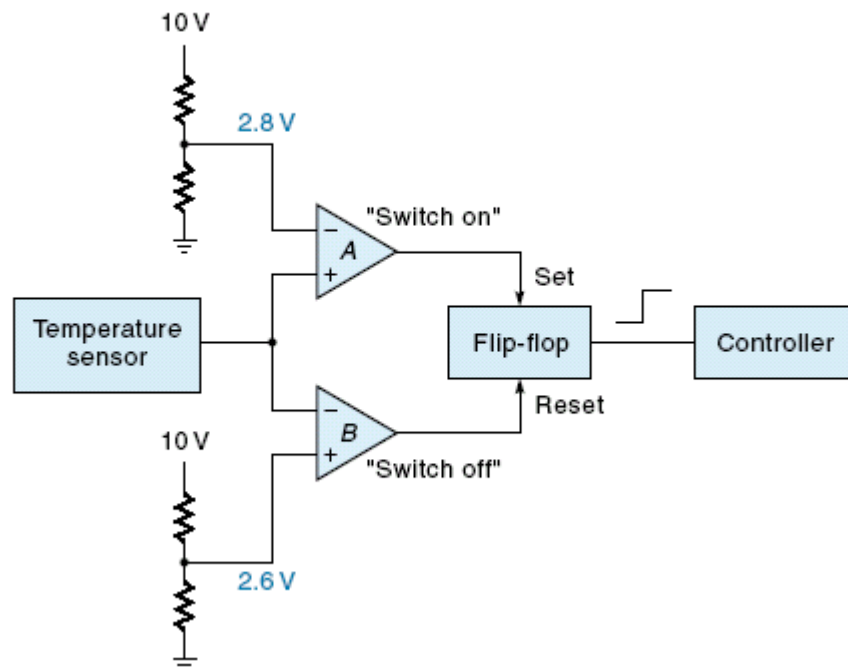
Saat V_2 sangat jauh positif dibandingkan V_1 maka output dari V_{out} akan saturasi menjadi $+V$ sebaliknya saat V_1 sangat jauh positif dari V_2 maka V_{out} akan saturasi menjadi $-V$.

Misal sebuah panel solarcell air panas akan menyalakan blower saat temperaturnya mencapai 100°F . Sebuah sensor temperatur analog digunakan untuk menghubungkan solarcell ini dengan pengatur. Pengatur akan menyalakan dengan tegangan 5V saat sensor temperatur analog mengirimkan $2,7\text{V}$. Rangkaian dari sistem kontrol ini dapat dilihat pada gambar 3.22.



Gambar 3.22 Sistem Kontrol Blower menggunakan comparator

Biasanya akibat noise tegangan keluaran akan berosilasi saat V_{in} mendekati batas (threshold), hal ini membuat penyalan menjadi bergetar dan tidak stabil yang disebut chatter. Salah satu cara mengatasi ini adalah dengan menambahkan window comparator yang di dalamnya terdapat hysteresis untuk menghindari chatter ini.



Gambar 3.23. Sistem Kontrol Blower menggunakan window comparator

Switch, Relay dan Semikonduktor pengendali daya

4.1. Pendahuluan

Kemampuan yang paling sering ada pada sistem kontrol adalah kemampuan untuk mengatur aliran daya listrik yang biasa ada diantara pengatur dan aktuator. Biasanya sinyal keluaran dari pengatur yang kecil tidak cukup untuk menggerakkan aktuator sehingga dibutuhkan penguat tambahan.

Tiga klasifikasi komponen yang sering digunakan untuk mengatur daya listrik:

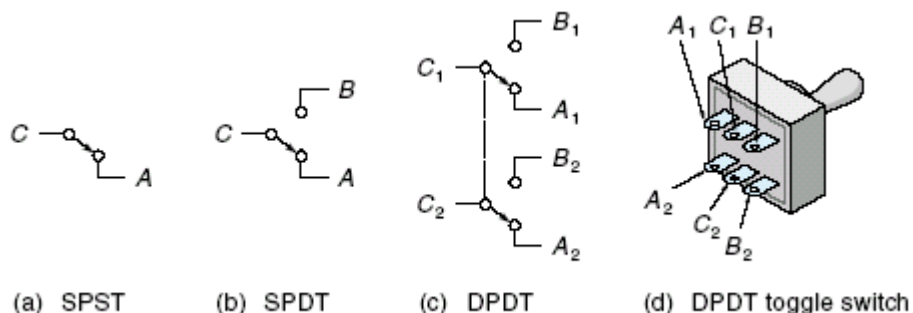
- Alat elektromekanik seperti switch dan relay
- Transistor daya dan Transistor efek medan
- Semikonduktor yang disebut thyristor, yang terdiri dari dioda dan triacs

4.2. Switch

Switch adalah alat yang dapat membuka atau menutup suatu koneksi, sehingga arus listrik dapat diatur untuk mengalir atau tidak.

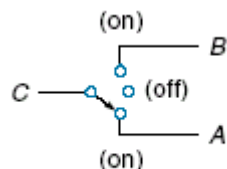
4.2.1. Toggle Switch

Switch yang paling umum digunakan dan paling banyak variasi konfigurasi kontakannya adalah toggle switch. Setiap switch terdiri dari satu atau lebih kutub yang masing-masing kutub adalah switch. Salah satu konfigurasi kontak yang paling sederhana adalah Single Pole/Single Throw (SPST). SPST hanya memiliki satu kontak untuk terbuka atau tertutup. Jenis lain adalah Single Pole/ Double Throw Switch (SPDT) memiliki dua kontak A dan B. Lengan penggerak disebut common atau wiper. Tipe lainnya adalah Double Pole/ Double Throw Switch (DPDT) yang terdiri dari dua SPDT di dalam suatu rumah. Seluruh jenis ini memiliki dua posisi yaitu on atau off.



Gambar 4.1. Kontrol kontak pada Toggle Switch

Jenis lain ada yang memiliki tiga posisi yaitu on-off-on. Terdapat posisi yang sama sekali tidak terhubung (off). Switch jenis ini dapat digunakan untuk menggerakkan motor saat maju-diam-mundur



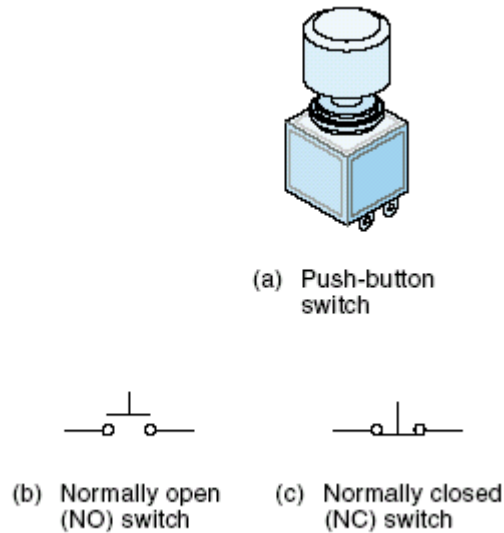
Gambar 4.2. Switch tiga posisi

Beberapa jenis toggle switch terdiri satu atau lebih posisi kontak yang dipertahankan oleh pegas. Tegangan harus diberikan agar posisi kontak tetap tidak bergerak. Jenis toggle switch ini disebut momentary-contact switch (switch kontak sementara) misalnya switch untuk kunci kontak pada mobil. Toggle switch memiliki maksimum tegangan dan arus pada AC maupun

DC. Misal toggle switch dapat bekerja pada 5A untuk 125 V_{AC} atau 5 A untuk 28 VDC.

4.2.2. Push-Button Switch (Saklar Tekan)

Push-Button termasuk momentary-contact switch karena mengandalkan pegas untuk terjadi posisi tekan ataupun lepas.

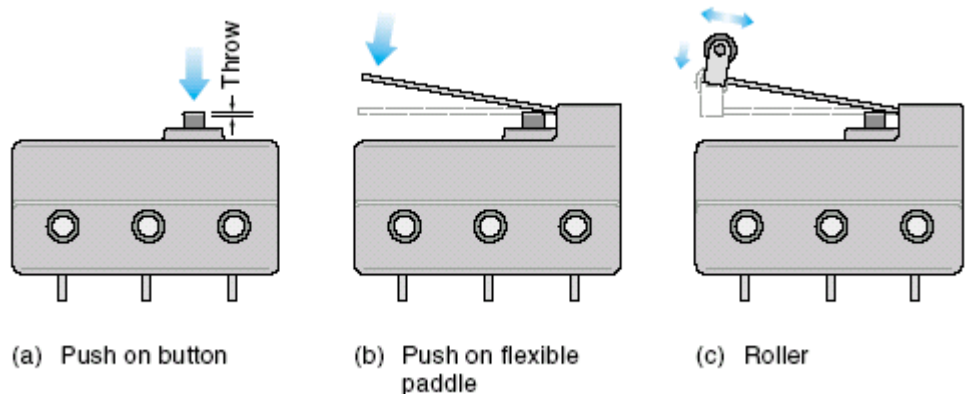


Gambar 4.3. Push-Button Switch dan simbolnya

Terdapat dua konfigurasi pada Push-Button Switch (gambar 4.3) yaitu Normally open (NO) dan Normally Closed. Normally Open artinya switch akan tetap terbuka sampai di tekan, Normally Closed artinya pada kondisi tidak di tekan switch dalam keadaan tertutup jika ditekan baru akan terbuka.

4.2.3. Limit Switch

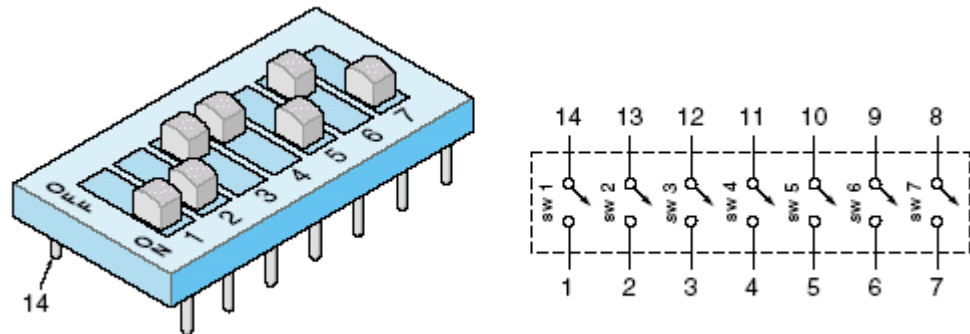
Limit Switch adalah jenis Push-Button Switch yang dipasang pada suatu ujung dan kontak akan terjadi oleh benda yang bergerak. Misalnya switch pada pintu mobil yang akan menyalakan lampu bila tidak tertekan. Pergerakan benda yang menyentuhnya dapat dilihat pada gambar 4.4. di bawah ini. Diperlihatkan sebuah switch kecil yang disebut microswitch tertekan karena lemparan (a), batang ungkit (b) dan roller(c)



Gambar 4.4. Limit Switch

4.2.4. Dip Switch

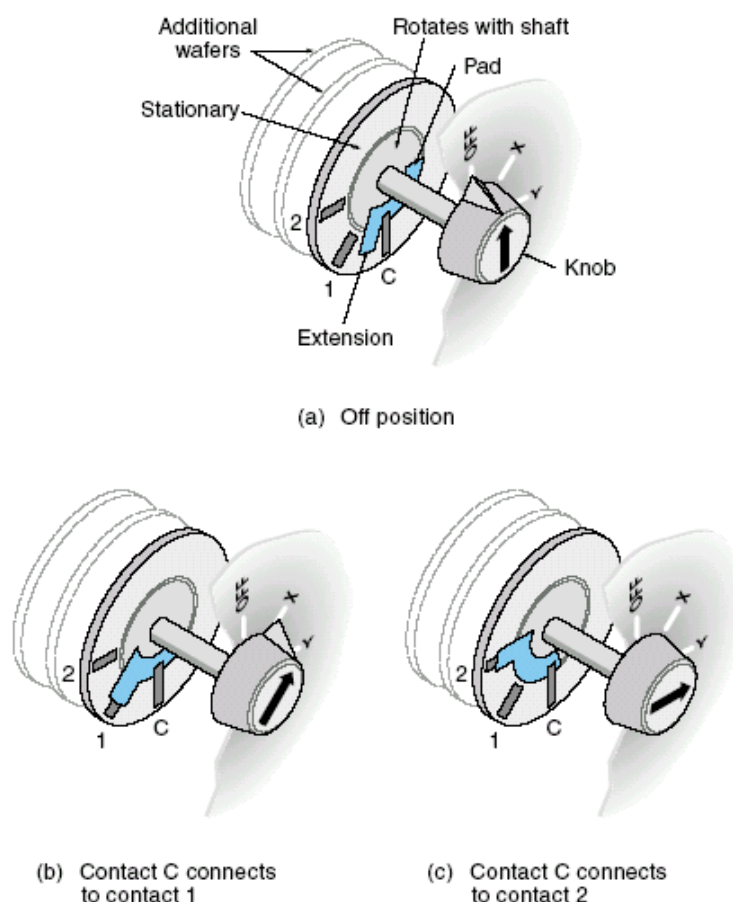
Dip Switch adalah sekumpulan SPST switch yang berbentuk Integrated Circuit (IC). Dip Switch dapat dipasang pada soket IC atau langsung di solder pada circuit board. Setiap switch menggunakan dua pin misalnya switch satu menggunakan pin 1 dan 14 (Gambar 4.5)



Gambar 4.5. Dip Switch

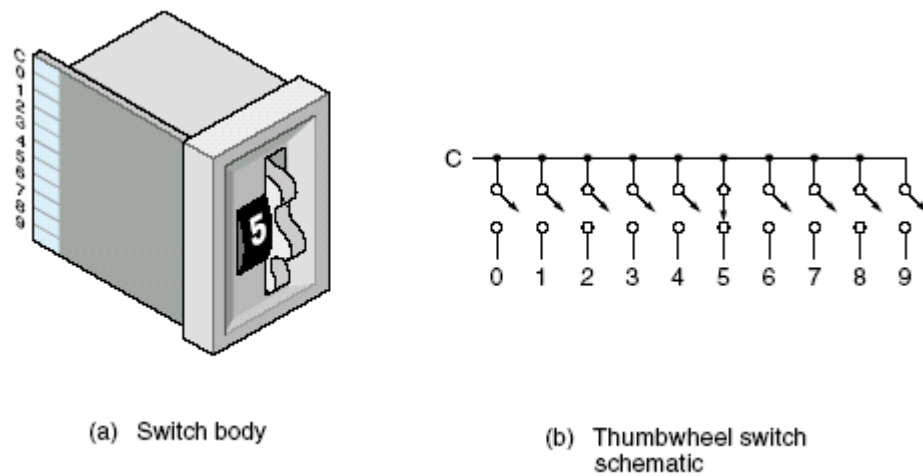
4.2.5. Rotary Switch

Sesuai dengan namanya rotary switch adalah switch yang proses kontaknya terjadi dengan cara memutarkannya. Rotary Switch terdiri dari lapisan dalam yang akan bergerak mengikuti putaran batang penggeraknya.



Gambar 4.6. Rotary Switch

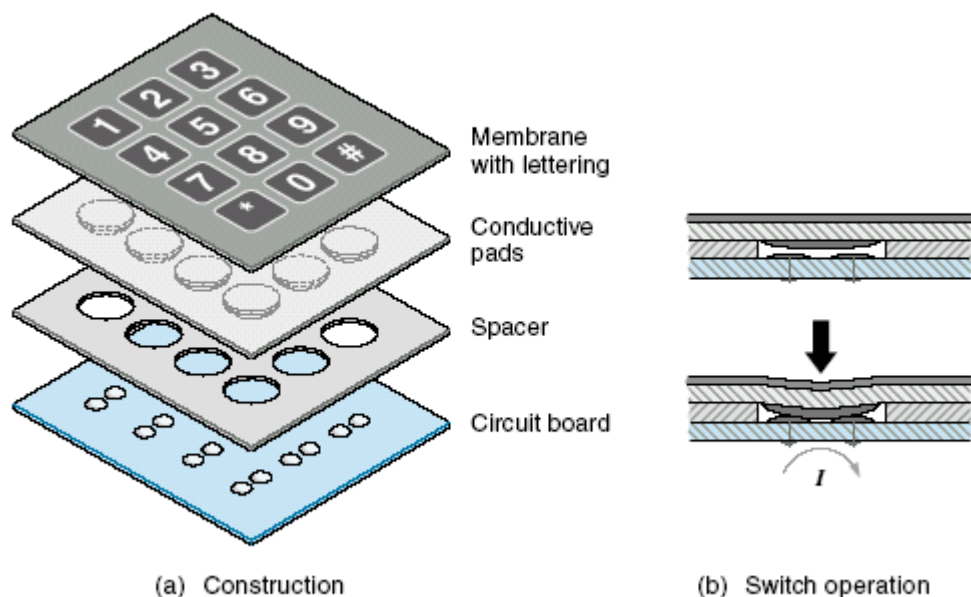
Bentuk khusus dari rotary switch adalah thumbwheel switch, switch ini proses kontak terjadi dengan cara memutar sebuah piringan yang sekaligus akan memutar angka penunjuk switch. Jenis ini digunakan untuk memasukkan data numerik



Gambar 4.7. Thumbwheel switch

4.2.6. Membrane Switch

Jenis ini berupa keypad yang terdiri dari sekompok push-buttoh switch. Switch jenis ini tersusun dari beberapa lapisan, mulai dari lapisan angka hingga lapisan yang menempel pada circuit board



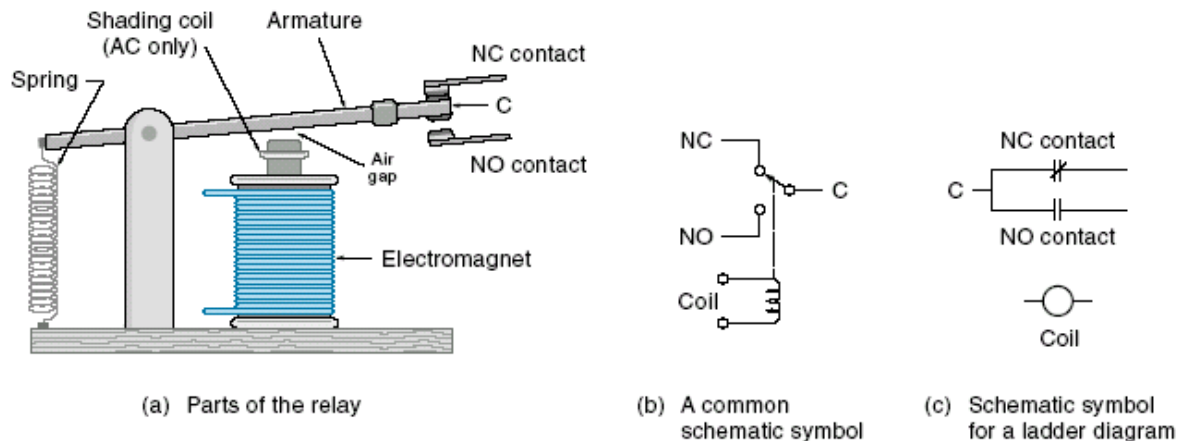
Gambar 4.7. Membrane Switch

4.3. Relay

4.3.1. Electromechanical Relay

Electromechanical Relay adalah jenis relay yang menggunakan gaya elektromagnetik untuk membuka atau menutup switch. Bila suatu kumparan diberi listrik maka akan timbul gaya elektromagnetik yang akan menarik

armatur sehingga terjadi kontak dengan suatu inti switch. Jenis relay ini bisa normally closed atau normally open



Gambar 4.8. Electromechanical Relay

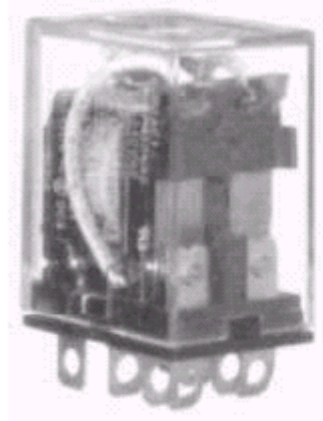
Tegangan listrik yang diberikan pada kumparan (coil) sangat kecil jika dibandingkan dengan tegangan kontak. Pada tegangan kontak perlu diperhitungkan besar tegangan dan arus AC dan DC yang akan terhubung sedangkan pada kumparan cukup memperhitungkan tegangan dan tahanan kumparan (Tabel 4.1). Tegangan dan arus yang diberikan pada kumparan untuk menarik armatur disebut tegangan tarik (pull-in voltage) dan arus tarik (pull-in current) sedangkan tegangan yang diperlukan untuk menahan agar kumparan tetap bisa mempertahankan posisi armatur disebut tegangan penyangga (holding voltage) atau sealed voltage. Armatur tidak menyentuh kumparan karena terdapat pemisah udara.

Tabel 4.1. Data tegangan kumparan dan tahanan kumparan
Typical General-Purpose Relays*

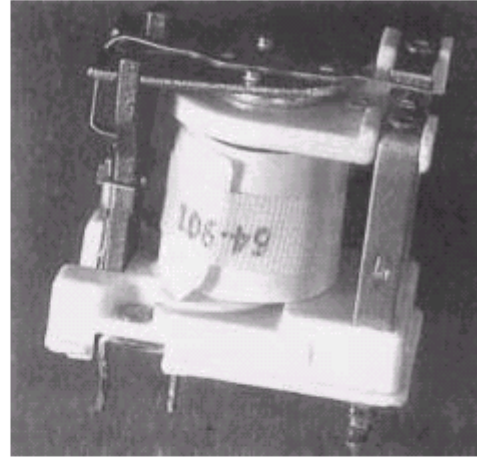
Type	Coils		Action
	Input	Ohm	
Y1-SS1.0K	6 DC	1,000	SPDT
Y1-SS220	3 DC	220	SPDT
Y2-V52	6 DC	52	2PDT
Y2-V185	12 DC	185	2PDT
Y2-V700	24 DC	700	2PDT
Y2-Y2.5K	48 DC	2,500	2PDT
Y2.15K	115 DC	15,000	2PDT
Y4.V52	6 DC	52	4PDT
Y4-V185	12 DC	185	4PDT
Y4-V700	24 DC	700	4PDT
Y4-V2.5K	48 DC	2,500	4PDT
Y4-V15K	115 DC	15,000	4PDT
Y6-V25	6 DC	25	6PDT
Y6-V90	12 DC	90	6PDT
Y6-V430	24 DC	430	6PDT
Y6-V1.5K	48 DC	1,500	6PDT
Y5-V9.0K	115 DC	9,000	6PDT

*Contacts: 2 A typically, 3 A maximum 125 Vac or 28 Vdc.

Relay terdiri dari beberapa variasi ukuran, konfigurasi kontak dan kemampuannya mengatasi daya. Mulai dari yang berukuran kecil yang dapat dipasang pada circuit board dan diberi daya kecil langsung dari gerbang logika. Bisa juga berupa relay daya yang mampu mengontakkan daya dengan arus besar hingga 50 A. Jenis ini sering juga disebut contactor. Beberapa jenis relay dapat dilihat pada gambar 4.9



(a) General purpose relay



(b) General purpose relay



(c) High current relay

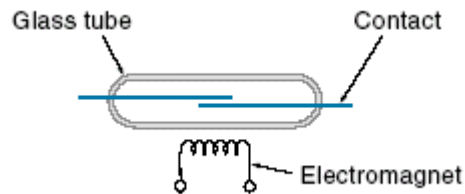


(d) Industrial relay

Gambar 4.9. Berbagai jenis relay buatan Rockwell Automation

4.3.2. Reed Relay

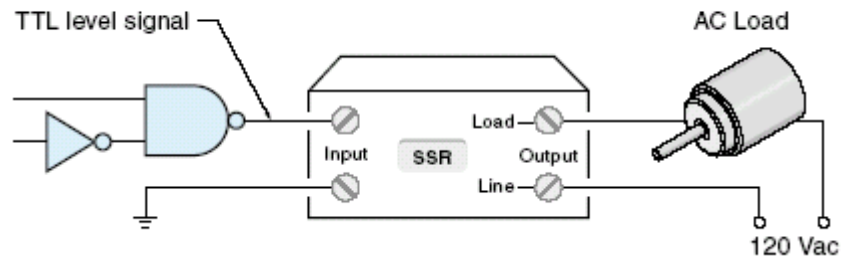
Reed relay adalah relay yang sangat unik, switch tempat terjadinya kontak terdapat di dalam sebuah tabung. Tabung ini bisa vakum bisa berisi nitrogen. Proses kontak dilakukan dengan menarik batang kontak dari luar tabung mempergunakan gaya elektromagnetik. Batang kontak bisa ditaburi oleh air raksa kering atau basah agar memperluas daerah kontak. Jenis ini lebih tahan lama dan memiliki tegangan kumparan yang kecil standar TTL. Pengontor dapat dihindari pada jenis ini karena batang kontak berada di dalam tabung terbungkus. Tapi jenis ini digunakan pada daya kontak yang rendah (2 A) dan mudah terpengaruh getaran.



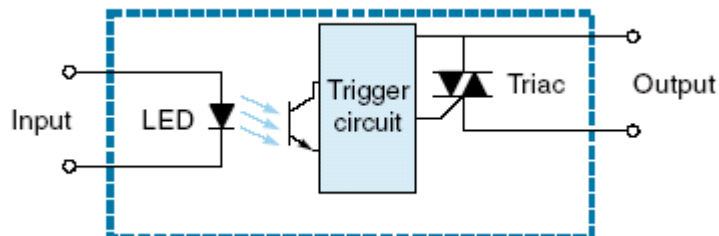
Gambar 4.10. Reed Relay

4.3.3. Solid State Relay

Jenis ini berupa relay berbentuk semikonduktor yang dibuat dengan teknik solid state (salah satu teknik pembuatan semikonduktor). Solid State Relay (SSR) penggunaannya sering menggantikan electromechanic relay khususnya untuk meng-on atau off kan beban AC misalnya motor dengan 120 V_{AC} (Gambar 4.11) Secara fisik berbentuk 4 terminal yaitu dua terminal input dan dua terminal output. Biasanya SPST normally open



Gambar 4.11. Solis State Relay (SSR) digunakan pada motor AC



Gambar 4.12. Rangkaian SSR

Tegangan input untuk SSR bisa berupa skala TTL (5 V_{dc}), 24 V_{dc} atau 120 V_{ac}.

Motor DC (Direct Current)

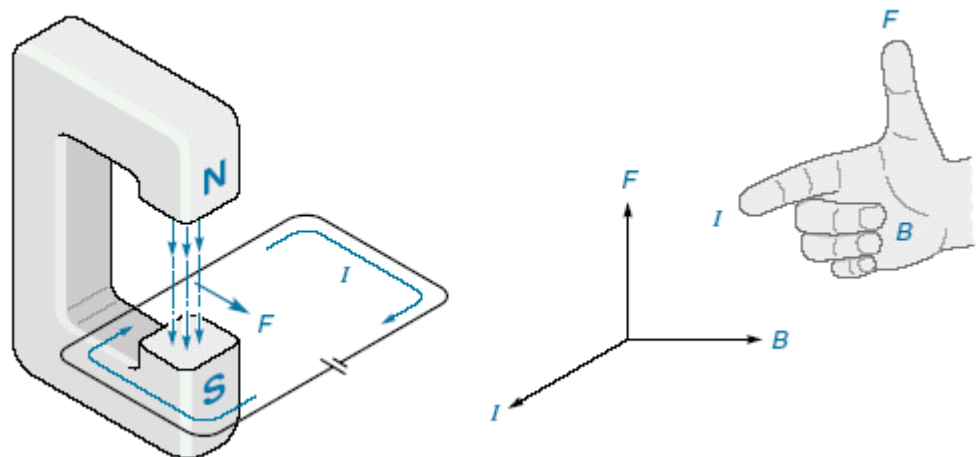
5.1. Pendahuluan

Salah satu komponen yang tidak dapat dilupakan dalam sistem kontrol adalah aktuator. Aktuator adalah komponen yang selalu bergerak mengubah energi listrik menjadi pergerakan mekanik. Salah satu aktuator adalah motor listrik.

Motor listrik dapat digolongkan menjadi motor DC dan motor AC tergantung dari suplai dayanya. Motor AC lebih menguntungkan dibandingkan dengan motor DC karena lebih kecil, lebih handal dan tidak terlalu mahal. Tetapi kecepatan motor AC tidak dapat diatur, kecepatannya selalu tetap sesuai dengan frekuensi dari jala-jala listrik. Sedangkan motor DC baik kecepatan, laju dan arah putarnya dapat diatur dengan mudah sesuai dengan keinginan. Motor DC yang kecil bahkan dapat digerakkan dengan tegangan DC yang kecil misalnya motor pada disk drive yang digerakkan dengan tegangan 12 Volt.

5.2. Teori Dasar

Teori dasar dari motor DC diawali dengan sebuah konduktor yang dialiri listrik berada di dalam suatu medan magnetik akan mengalami gaya tarik yang arahnya tegak lurus terhadap arus listrik dan medan magnetik (Gambar 5.1). Konduktor bisa terbuat dari besi, tembaga atau aluminium.



(a) Kontrol percobaan

(b) Arah I, F dan B saling tegak lurus

Gambar 5.1. Gaya pada kawat di dalam medan magnetik

Untuk membuktikannya dapat dilakukan percobaan menggunakan magnet U, kawat dan baterai. Lalu atur sesuai gambar 5.1.a maka pada kawat akan ada hentakan saat baterai dihubungkan. Besarnya magnituda dari gaya tersebut dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$F = IBL\sin\theta \quad (5.1)$$

Dengan

F = gaya pada konduktor (Newton)

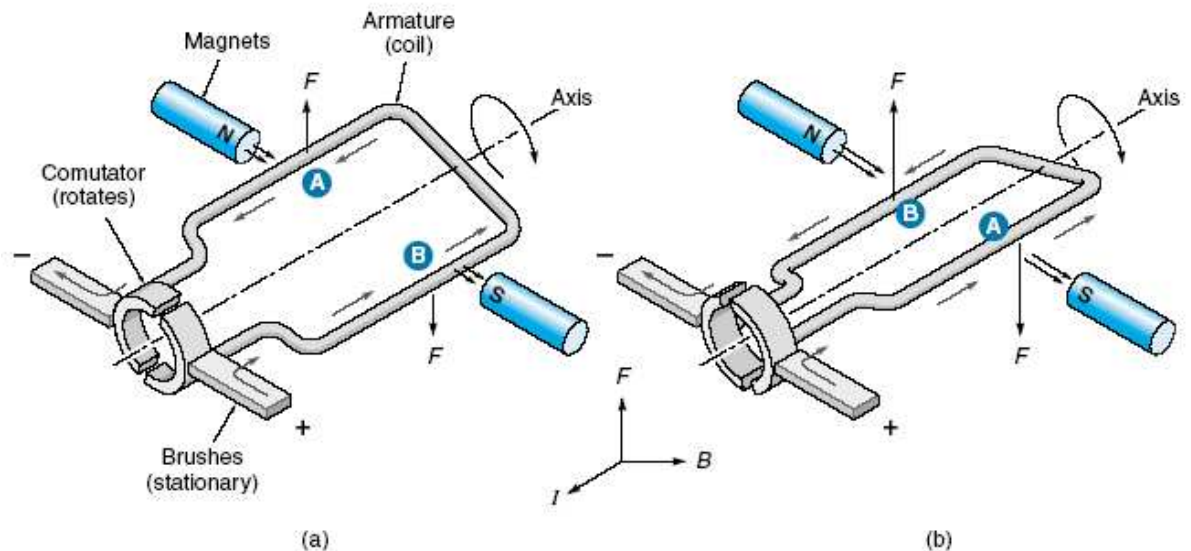
I = arus pada konduktor (Ampere)

B = Kerapatan Fluks magnetik (Gauss)

L = Panjang kawat (meter)

θ = sudut antara arus dan medan magnetik

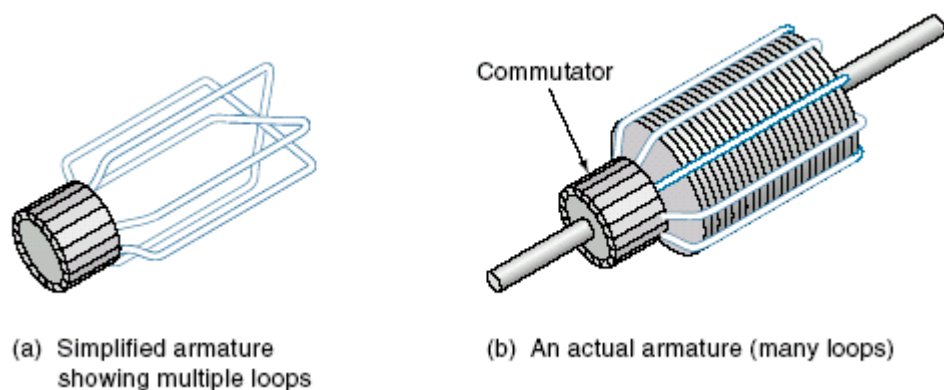
Motor listrik memanfaatkan prinsip ini untuk membuat suatu putaran yaitu dengan membentuk kawat menjadi suatu lup dan menempatkan di dalam medan magnetik (Gambar 5.2)



Gambar 5.2. Motor DC konvensional

Lup atau kumparan ini akan berputar pada suatu sumbu yang diperlihatkan pada gambar 5.2. Kumparan ini disebut lilitan armatur. Armatur ini ditempatkan di dalam medan magnetik yang disebut medan. Comutator dan Brush mengalirkan arus listrik ke armatur dan menyebabkan armatur ini berputar. Pada gambar 5.2.a. Arus listrik pada kawat A mengalir masuk sedangkan pada kawat B arus listrik masuk kedalam. Sesuai dengan aturan tangan kanan pada gambar 5.1.b maka gaya pada kawat A akan menaik sedangkan gaya pada kawat B akan turun sehingga kumparan akan berputar searah jarum jam. Pada saat kawat sudah berputar 90° arus listrik pada kawat B akan berbalik ke arah masuk sedangkan arus listrik pada kawat A akan keluar, ini semua akibat cincin comutator yang menyentuh kutub yang berbeda pada brush sehingga arah gaya pada kawat B adalah ke atas dan arah gaya pada kawat A adalah ke bawah sehingga kumparan terus berputar searah jarum jam.

Torsi adalah gaya putar pada motor. Torsi maksimum pada saat kumparan berada pada posisi horisontal dan menjadi minimum pada saat kumparan berada pada posisi vertikal. Sebuah armatur motor DC terdiri dari beberapa kumparan yang membentuk torsi keseluruhan (gambar 5.3). Setiap kumparan berhubungan dengan comutator yang terpisah.



Gambar 5.3. Armatur Motor DC

Parameter penting dalam setiap motor DC adalah torsi ini. Torsi dapat dihitung dari gaya pada persamaan (5.1) dan bila disederhanakan menjadi

$$T = K_T I_A \phi \quad (5.2)$$

Dengan

T = Torsi motor

K_T = Konstanta yang tergantung dari konstruksi motor

I_A = Arus armatur

ϕ = fluks magnetik

Motor DC dapat bekerja sebaliknya yaitu mengubah dari energi mekanik gerak menjadi energi listrik yang disebut dengan generator. Saat ada gaya putar luar memutar comutator, motor DC akan menimbulkan tegangan yang disebut electromotive force (EMF). Tapi saat motor DC digerakkan oleh daya listrik terdapat juga tegangan balik yang arahnya berlawanan dengan arus armatur yang disebut dengan counter-electromotive force (CEMF). CEMF ini mengurangi tegangan armatur (V_A). CEMF ini akan meningkat dengan meningkatnya laju putar motor dan sebaliknya akan berkurang saat laju motor berkurang.

$$V_A = V_{in} - \text{CEMF} \quad (5.3)$$

Motor DC memiliki kemampuan untuk mempertahankan lajunya saat dihubungkan dengan beban yang disebut dengan Self-regulation speed. Saat beban meningkat laju berkurang sekaligus menurunkan CEMF. Saat CEMF menurun tegangan armatur akan naik dan menyebabkan laju motor meningkat kembali.

5.3. Wound-Field DC Motor

Wound-Fields DC Motor (wound = bentuk lampau dari wind) menggunakan elektromagnetik yang disebut lilitan medan (Field winding) untuk menghasilkan medan magnetik. Magnet yang dihasilkan ini bukan magnet permanen, laju putar motor diatur dengan memvariasikan tegangan armatur atau lilitan medan. Gambar 5.4 menunjukkan salah satu contoh wound-field DC Motor.

Wound-field DC motor. (Explosion-proof means no open sparks.)
(Courtesy of Reliance Electric)

FEATURES

- ADJUSTABLE SPEED
- 90 V ARMATURE 50/100 V FIELD(3)
- CLASS F INSULATION
- 40°C AMBIENT
- EXPLOSION-PROOF(1)
- FOR OPERATING FROM FULL WAVE SINGLE-PHASE RECTIFIED POWER (TYPE K)
- RIGID MOUNT C-FACE



WOUND FIELD

EXPLOSION-PROOF

$\frac{1}{4}$ –1 HP

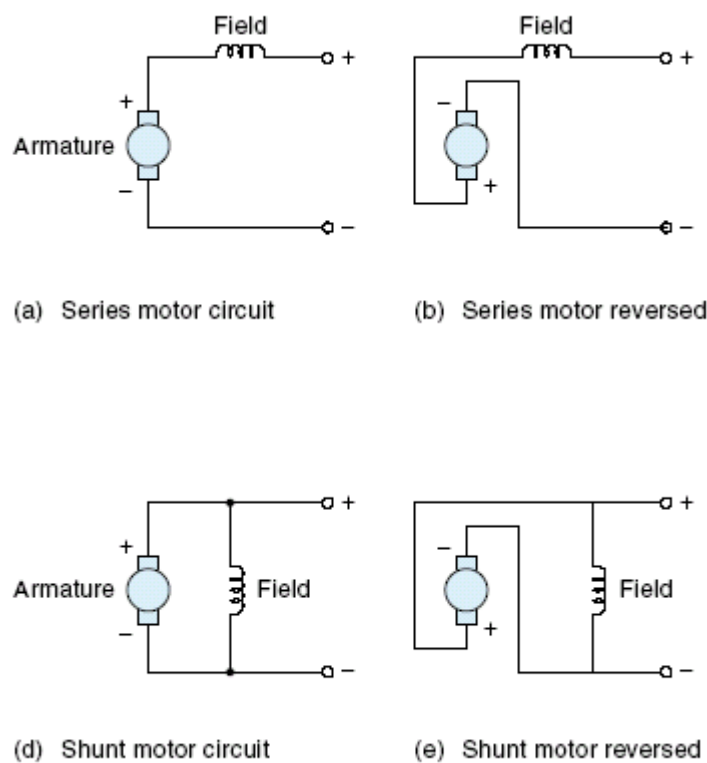
TOTALLY ENCLOSED • FAN-COOLED

HP	RPM	Enclosure	Frame #
$\frac{1}{4}$	3500	TEFC-XP	HM56HC
	2500	TEFC-XP	HB56HC
	1750	TEFC-XP	HB56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HU56HC
$\frac{1}{3}$	3500	TEFC-XP	HG56HC
	2500	TEFC-XP	HU56HC
	1750	TEFC-XP	HB56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HJ56HC
$\frac{1}{2}$	3500	TEFC-XP	HU56HC
	2500	TEFC-XP	HG56HC
	1750	TEFC-XP	HJ56HC ♦
	1150	TEFC-XP	HE56HC
$\frac{3}{4}$	3500	TEFC-XP	HU56HC
	2500	TEFC-XP	HJ56HC
	1750	TEFC-XP	HJ56HC ♦
1	3500(2)	TEFC-XP	HJ56HC
	2500(2)	TEFC-XP	HE56HC
	1750(2)	TEFC-XP	HE56HC ♦

Gambar 5.4. Wound-Field DC Motor

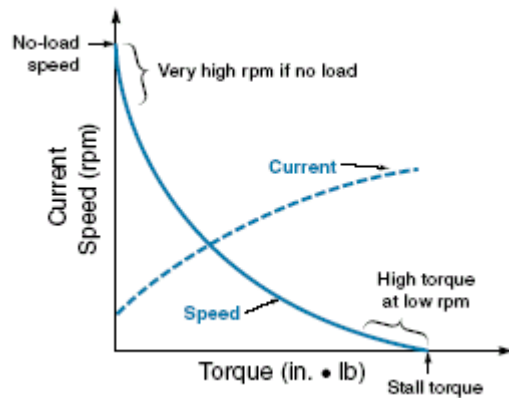
Jenis pada gambar 5.4 ini menghasilkan daya $\frac{1}{4}$ sampai 1 hp (horse power) dengan beberapa laju rata-rata. Laju rata-rata adalah laju motor saat menghasilkan daya tersebut. Jika tanpa beban maka lajunya akan lebih besar dari laju rata-rata. Beberapa jenis wound-field DC motor adalah motor lilitan seri, shunt (paralel) dan gabungan seri-shunt. Jenis ini digerakkan dengan 90 V_{dc}, nilai 90 V_{dc} ini diperoleh menggunakan pembalik tegangan (rectifier) dari 120 V_{ac}.

Pada motor lilitan seri (series-wound motor), lilitan armatur dan lilitan medan dibuat seri sehingga torsi awal motor menjadi sangat besar contohnya adalah motor starter mobil. Torsi terbesar terjadi pada saat beban sangat besar dan motor tidak dapat bergerak. Torsi maksimum ini disebut Torsi diam (Stall Torque). Beberapa sistem kontrol dirancang untuk menggerakkan motor pada kondisi stall torsi misal untuk membuat penggerak lengan robot dari posisi diam. Karena posisi diam membutuhkan torsi yang sangat besar.



Gambar 5.5. Motor lilitan seri dan shunt

Pada saat tidak ada beban motor lilitan seri akan menghasilkan putaran yang sangat besar yang disebut laju tanpa beban (no-load speed) (Gambar 5.6). Pada beberapa motor yang besar bila tidak ada beban akan mudah rusak karena terjadi laju putaran yang sangat besar.

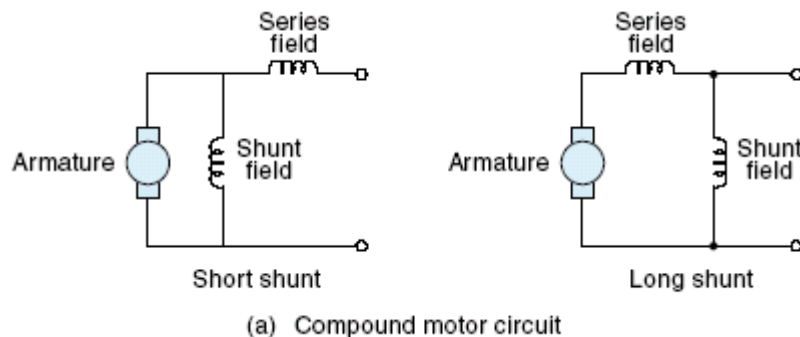


Gambar 5.6 Kurva laju dan torsi

Pada Motor lilitan shunt (shunt-wound motor), lilitan armatur dan lilitan medan dihubungkan secara paralel akibatnya arus medan tidak berpengaruh pada perubahan arus suplai dan hanya terpengaruh oleh tegangan suplai. Shunt-wound motor digunakan untuk keperluan dengan laju yang relatif konstan misalnya pada kipas angin, blower, ban berjalan (conveyer belt).

Motor lilitan shunt memiliki stall torque dan no-load speed yang rendah dibandingkan motor lilitan seri.

Motor lilitan gabungan (compound-wound motor) menggabungkan kelebihan dari seri dan shunt motor. Jenis ini ada dua yaitu short shunt dan long shunt. Lilitan seri membuat motor memiliki torsi awal yang besar, setelah berjalan CEMF mengurangi tegangan pada lilitan seri sehingga lilitan shunt lebih dominan dan terjadi self-regulation speed yang menyebabkan laju putar motor menjadi konstan.



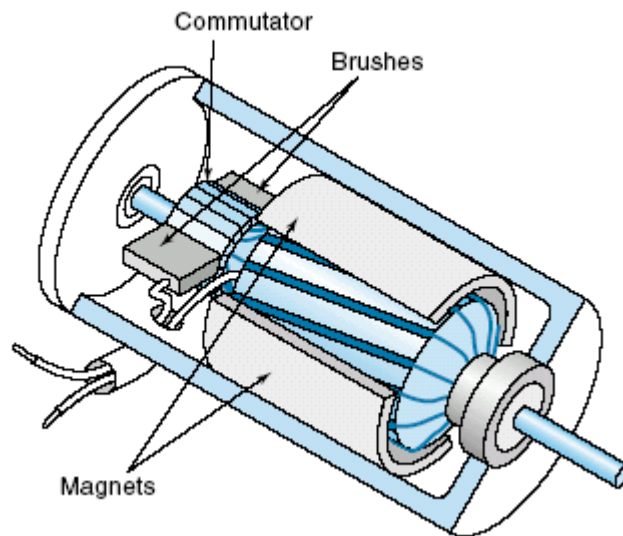
Gambar 5.7. Compound-wound motor

5.4. Permanent-Magnet (PM) Motor

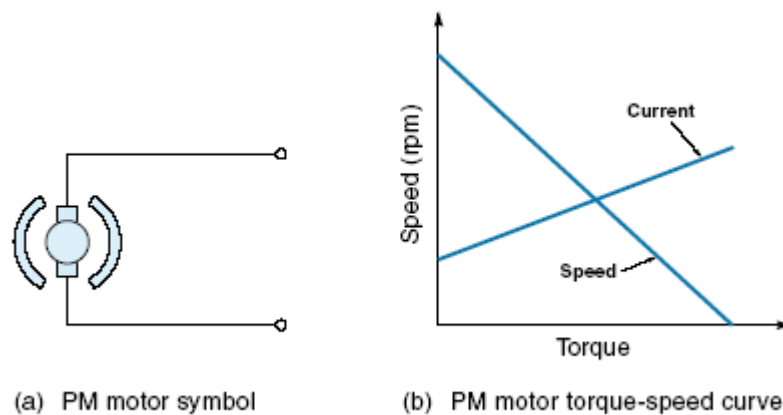
Jenis ini menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan fluks magnetik, armaturnya sama dengan armatur pada wound-field motor. Terdapat tiga tipe magnet yang dipergunakan yaitu (1) Alnico magnet (terbuat dari paduan/alloy logam besi) memiliki fluks magnetik yang tinggi (high-fluks magnet) tetapi sifat magnetnya bisa hilang saat terjadi stall (2) Ferrite, memiliki fluks magnetik yang lebih kecil tetapi memiliki daya tahan terhadap demagnetisasi (3) rare-earth magnet (magnet tanah jarang) terbuat dari bahan samarium-cobalt atau neodymium-cobalt. Jenis terakhir ini menggabungkan keunggulan dari kedua jenis pertamanya yaitu memiliki fluks magnetik yang tinggi dan tahan terhadap demagnetisasi.

Contoh motor dengan magnet permanen yang kecil adalah pada mesin kantor seperti printer, disk driver, mainan, VCR, kamera (untuk zoom dan autofokus)

sedangkan yang berukuran besar misalnya untuk sistem kontrol pada industri dan robotika.



Gambar 5.8. Permanent-Magnet Motor

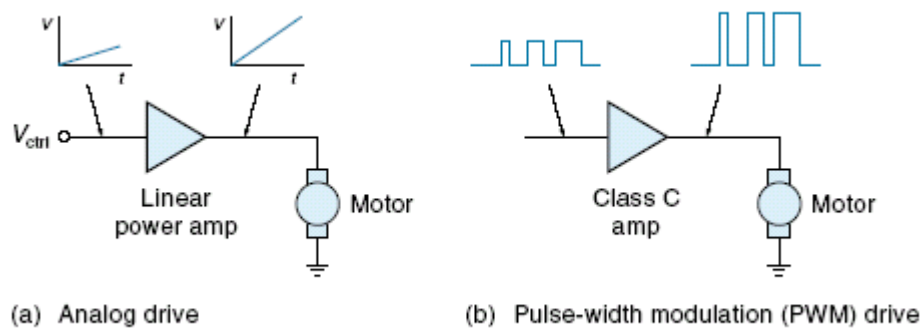


Gambar 5.9. a) Simbol Motor dengan magnet permanen b) hubungan laju dengan torsi

5.5. Rangkaian Pengontrol Motor DC

Terdapat beberapa rangkaian untuk mengatur laju putar motor. Sebenarnya penggunaan istilah kontrol laju kurang tepat karena yang diubah adalah energi listrik menjadi torsi, sedangkan laju ditentukan oleh torsi dan bebannya.

Terdapat dua teknik untuk menggerakkan (drive) motor yang pertama disebut analog drive yaitu suatu rangkaian interfacing yang digunakan untuk memperkuat sinyal dari pengatur (controller) agar cukup untuk menggerakkan motor. Biasanya berupa Linear Power Amplifier. Sedangkan teknik kedua adalah untuk menggerakkan motor adalah Pulse-width modulation (PWM). Pada teknik ini daya disuplai ke motor dalam bentuk pulsa DC dengan tegangan yang tetap. Lebar pulsa divariasikan untuk mengatur laju motor, semakin besar lebar pulsa maka semakin besar laju rata-rata motor. Frekuensi pulsa sangat besar sehingga membuat motor berputar secara halus.

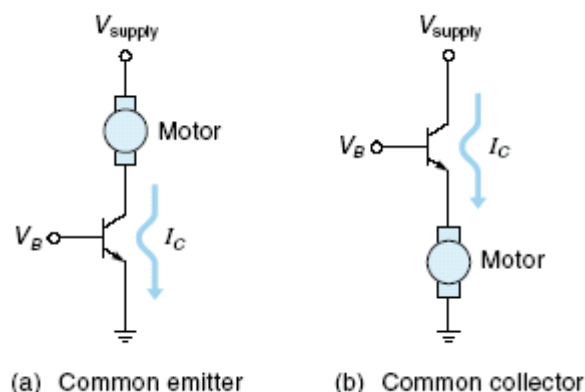


Gambar 5.10 Dua metoda mengatur laju motor DC

5.5.1. Kontrol Motor Dc Menggunakan Penggerak Analog (Analog Drive)

Sistem penggerak analog berupa linier power amplifier yang ditempatkan diantara pengatur dan motor. Biasanya berupa penguat arus sedangkan tegangan keluaran boleh lebih kecil atau lebih besar dari tegangan input motor.

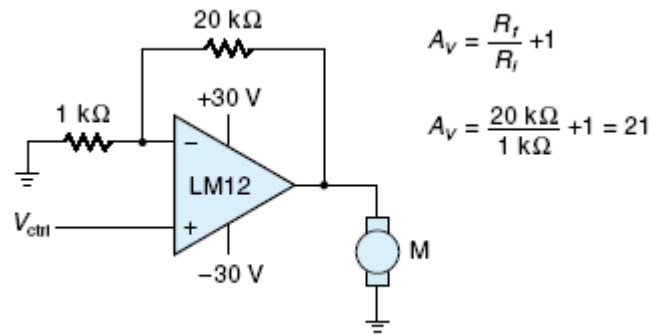
Rangkaian penggerak analog yang sederhana adalah Amplifier Kelas A yaitu amplifier yang menggunakan sebuah transistor saja. Rangkaianya bisa berupa CE (common emitter) yang memberikan gain penguatan arus sekaligus tegangan atau CC (common collector) yang memberikan gain penguatan arus saja.



Gambar 5.11. Konfigurasi Penggerak Analog untuk Motor DC

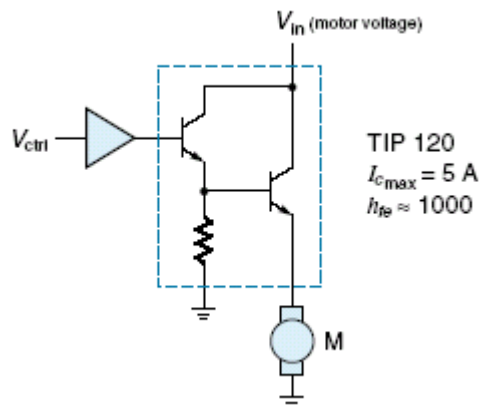
Cara kerja kedua rangkaian penggerak ini adalah sama, saat tegangan basis (V_B) naik melampau tegangan forward-bias maka transistor akan on dan membiarkan arus collector mengalir. Arus collector 30 – 100 kali lebih besar dari arus basis tergantung dari gain transistor (h_{fe}). Saat transistor on arus collector ditentukan oleh V_B . Tetapi amplifier kelas A sangat tidak efisien saat transistor on penuh arus collector mengalir sepenuhnya tetapi saat transistor setengah menyala (half-on) menyebabkan arus collector yang mengalir menjadi setengah juga. Half-on terjadi karena panas yang ditimbulkan oleh transistor menyebabkan dayanya berkurang.

Penggerak analog lainnya adalah Power IC, Darlington Power Transistor dan Mosfet Power. Power IC Driver berupa paket amplifier DC dengan arus output yang relatif besar, misalnya LM12 (National Semikonduktor) (gambar 5.12). Rangkaian daya tinggi ini bisa menghasilkan arus 13A dengan tegangan maksimum 30 Volt.



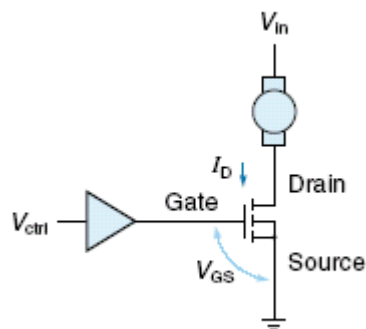
Gambar 5.12 LM12 Power Operational Amplifier (National Instrument)

Gambar 5.13 Menunjukkan rangkaian penggerak motor menggunakan Transistor Daya Darlington. Meskipun gain tegangan hanya 1 tetapi rangkaian ini memiliki gain arus sangat besar. Transistor yang digunakan pada gambar 5.13 adalah TIP 120 dengan gain arus (h_{fe}) 1000 dan arus output maksimum 5 A. Motor harus diletakkan pada emmiter.



Gambar 5.13 Penggerak Motor DC menggunakan transistor Darlington

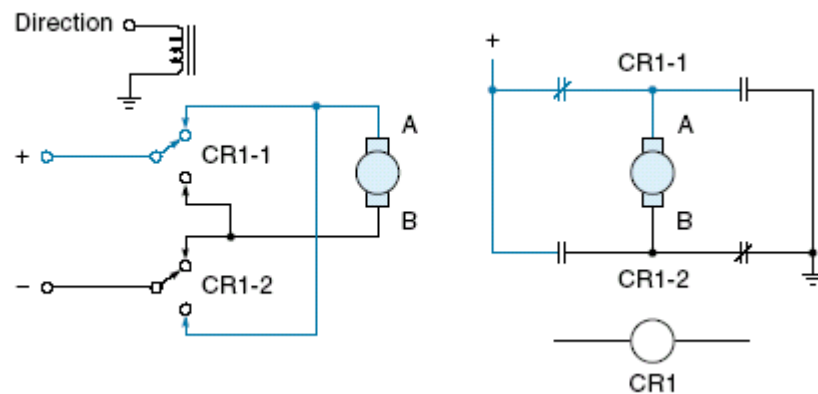
Rangkaian penggerak Motor DC lainnya adalah power MOSFET yang dikenal dengan nama VFET, TMOS dan HEXFET.



Gambar 5.14 Power MOSFET.

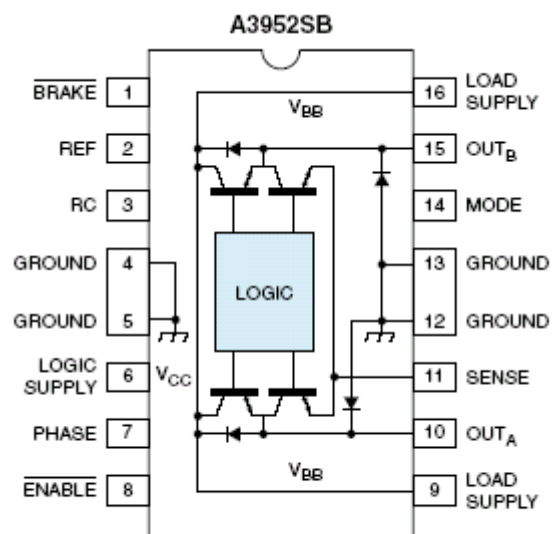
5.5.2. Membalik Putaran PM Motor

Untuk membalikkan putaran PM motor dilakukan dengan membalik polaritas dari tegangan input. Salah satu caranya adalah dengan membuat amplifier penggerak motor DC memiliki tegangan positif dan negatif terhadap ground. Rangkaian LM12 pada gambar 5.12 mampu memberikan tegangan positif dan negatif. Cara lain adalah dengan menggunakan relay (Gambar 5.15)



Gambar 5.15. Membalik putaran PM motor dengan relay

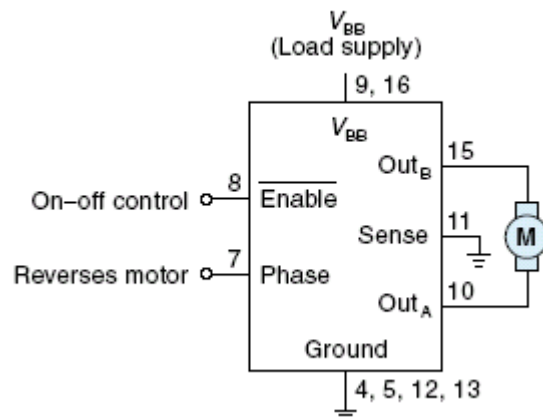
Sekarang ini untuk switching putaran maju-mundur dapat dilakukan hanya dengan menggunakan sebuah IC yang arah putaran diatur dengan memberikan arus yang berbeda pada masing-masing pinnya. Misal IC merk Allegro A3952



Dwg. PP-056

Gambar 5.16. Full PWM Motor Driver (Allegro A3952SB)

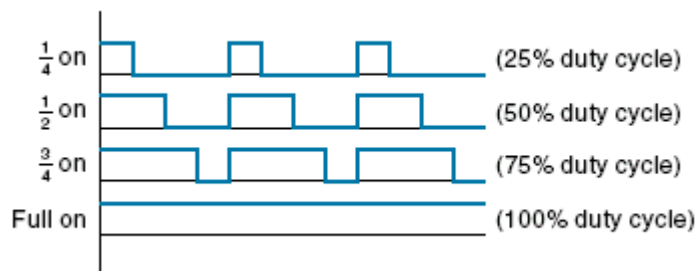
Arah putaran dapat diatur dengan menggunakan perubahan pada phase input (Gambar 5.17) pada pin 7. Jika diberi tegangan high maka putaran akan maju sebaliknya bila diberi tegangan low motor akan berputar berlawanan.



Gambar 5.17 Aplikasi Allegro A4952

5.5.3. Kontrol Motor DC Menggunakan Pulse-Width Modulation

Pulse-Width Modulation (PWM) memiliki cara yang sangat berbeda dalam mengatur torsi dan laju motor. Daya disuplai dalam bentuk gelombang pulsa kotak dengan magnituda yang tetap dengan lebar pulsa kotak atau *duty cycle* yang bervariasi. Duty cycle mengacu pada persentase waktu saat pulsa pada kondisi high. Gambar 5.18 menunjukkan beberapa duty cycle.

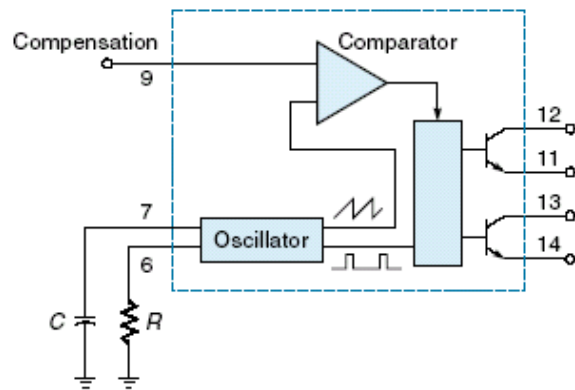


Gambar 5.18. Gelombang PWM

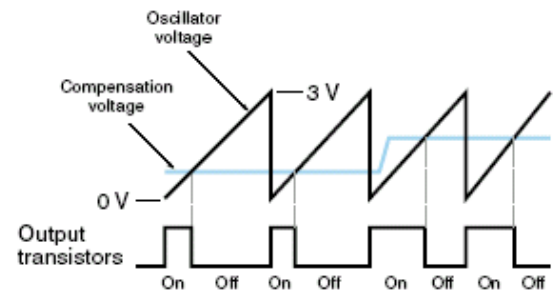
Pada laju terendah daya mensuplai $\frac{1}{4}$ dari waktu siklus (cycle time). Frekuensi dari pulsa diatur untuk mengatasi inersia (kelembaban) motor sehingga motor berputar dengan laju yang konstan. Pada 50% duty cycle motor berputar dengan laju setengah penuh. Rangkaian PWM bisa juga berupa rangkaian penggerak analog seperti rangkaian power transistor, power Darlington, Power MOSFET dan POWER IC. IC Allegro A3952 sangat cocok untuk digunakan sebagai PWM Driver Motor.

Tetapi agar tidak menyulitkan prosesor untuk menghasilkan sinyal perulangan ini biasanya digunakan IC khusus atau dengan Rangkaian pengatur waktu yang telah dipasang di dalam mikroprosesor .

Salah satu contoh IC yang bisa langsung menghasilkan gelombang PWM adalah jenis LM3524 (National Semiconductor). Duty Cycle dapat dibuat dari 0% - 100% dengan memberikan tegangan DC pada pin 9 (Gambar 5.19.a). Osilator di dalam IC ini bisa menghasilkan frekuensi PWM dalam bentuk gelombang gigi gergaji. Gelombang gigi gergaji ini dibandingkan oleh komparator dengan tegangan kompensasi yang diinputkan. Hasilnya berupa gelombang pulsa kotak berbentuk PWM. Transistor akan off saat gelombang gigi gergaji melampaui tegangan kompensasi (Gambar 5.19.b)



(a) Block diagram of a PWM IC (LM3524)



(b) Output transistors turn off when the oscillator voltage reaches compensation

Figure 7.29
Pulse-width modulation IC
(LM3524). (Courtesy of
National Semiconductor)

Gambar 5.19 Pulse-Width Modulation IC (LM3524)

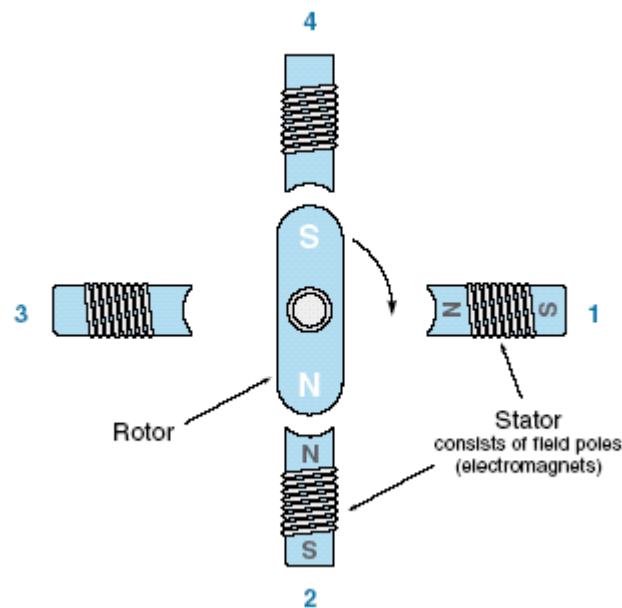
Bab VI

Motor Stepper

6.1. Pendahuluan

Motor stepper adalah motor DC yang khusus berputar dalam suatu derajat yang tetap yang disebut step (langkah). Satu step antara $0,9$ sampai 90° . Motor stepper terdiri dari rotor dan stator. Rotor adalah permanen magnet sedangkan stator adalah elektromagnet. Rotor akan bergerak jika stator diberi aliran listrik. Aliran listrik ini membangkitkan medan magnet dan membuat rotor menyesuaikan dengan kutub magnet yang dimilikinya.

Motor stepper digunakan khusus menentukan posisi batang motor tanpa harus mempergunakan sensor posisi. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menghitung jumlah step yang harus diberikan dari posisi acuan. Ukuran dari step ditentukan oleh jumlah rotor dan kutub stator. Tidak ada kesalahan kumulatif yaitu kesalahan sudut tidak terus bertambah dengan meningkatnya step.



Gambar 6.1. Motor Stepper

Motor stepper bekerja secara loop terbuka, yaitu pengatur mengirimkan sejumlah step ke motor untuk menggerakkan rotor ke posisi yang diinginkan. Sebagai contoh motor stepper pada floppy disk drive. Motor stepper memiliki kecepatan yang rendah dan sering digunakan tanpa reduksi gigi gerigi (gear reduction). Suatu jenis motor stepper dengan 500 pulsa/detik akan berputar 150 rpm. Tetapi motor stepper dapat dibuat berputar 1 rpm atau kurang dengan akurasi yang tinggi. Terdapat tiga jenis motor stepper yaitu magnet permanen, variable reluctance dan hibrid.

6.2. Permanent Magnet Stepper Motor

Permanent Magnet (PM) Stepper Motor menggunakan magnet permanen sebagai rotornya. Pada gambar 6.1 adalah jenis PM Motor Stepper dengan 4 medan (stator). Jika kumparan medan 1 diberi energi listrik maka kutub selatan rotor akan tertarik menuju kumparan ini. Jika kumparan 1 tidak diberi energi dan kumparan 2 diberi energi maka rotor akan berputar dan menuju kumparan 2. Jadi rotor memiliki step 90° untuk setiap kali pemberian energi ini.

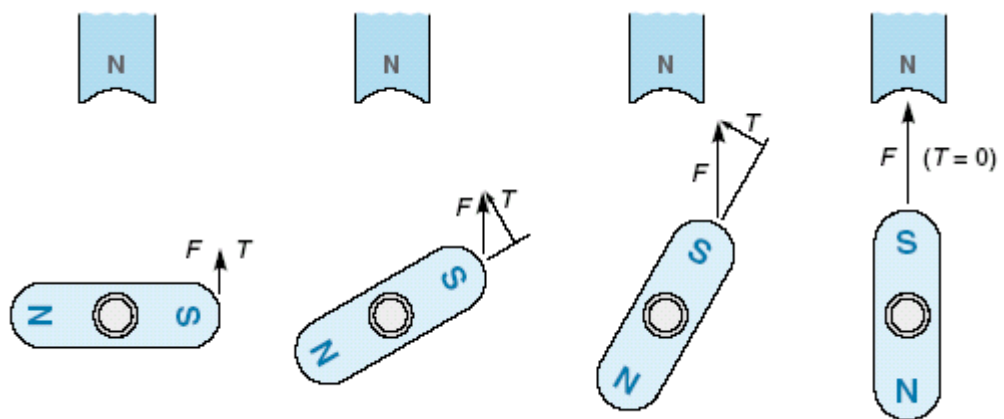
Salah satu sifat motor stepper yang diinginkan adalah rotor akan mengarah kepada kutub yang terdekat meski tidak dialiri listrik. Anda akan merasakan

hentakan magnet ini jika memutar motor stepper dengan tangan. Gejala ini disebut detent torque atau residual torque (torsi sisa). Torsi residu ini sangat diperlukan karena membuat motor berhenti pada step terakhir yang diperintahkan.

6.2.1. Efek Pembebanan Pada Motor Stepper

Dalam pengerjaan lup terbuka seharusnya motor stepper harus bergerak satu step setiap kali diperintah tetapi jika bebanya terlalu berlebihan motor stepper memiliki torsi untuk membuat satu step. Mungkin rotor akan berputar sedikit kemudian kembali ke posisi semula tanpa mencapai satu step. Ini yang disebut dengan stalled. Jika pengatur tidak memiliki umpan balik maka pengatur tidak akan pernah tahu kalau tidak tercapai sebuah step.

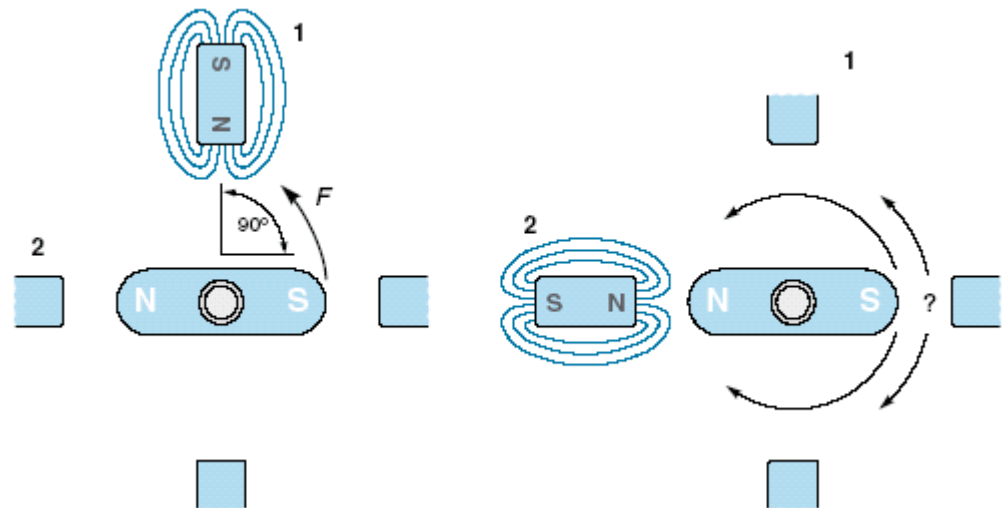
Pada saat rotor tepat pada kutub stator torsi adalah nol, torsi hanya terjadi pada saat rotor tepat pada kutub stator. Kejadian ini digambarkan pada gambar 6.2. Saat stator dialiri listrik terjadi gaya pada kutub utara rotor untuk bergerak menuju kutub selatan stator. Terjadi torsi yang memutar rotor dan gaya tarik semakin bertambah. Pada saat rotor tepat di depan stator (gambar terakhir di Gambar 6.2) terjadi gaya tarik yang paling besar tetapi torsi tidak ada. Pada prakteknya rotor akan berhenti sebelum tepat di depan stator saat torsi step yang melemah ini sama dengan torsi beban.



Gambar 6.2. Perubahan gaya dan torsi saat Rotor menuju stator

Misal rotor diinginkan berputar berlawanan arah jarum jam. Jika rotor tertinggal satu step (langkah) dari stator yaitu pada saat rotor baru mau bergerak kumparan kedua sudah dialiri (Gambar 6.3). Hal ini menyebabkan rotor bisa berputar berlawanan arah jarum jam tetapi bisa juga searah jarum jam dalam mengejar kutub utara stator.

Karena itu dibatasi agar rotor tidak tertinggal lebih dari setengah step. Pada saat ini torsi yang dimiliki motor akan cukup untuk memutar rotor sampai ke arah yang diinginkan tanpa harus stall. Pada saat motor berputar dengan cepat, step dari motor akan tetap dengan adanya kelembaban dari rotor.

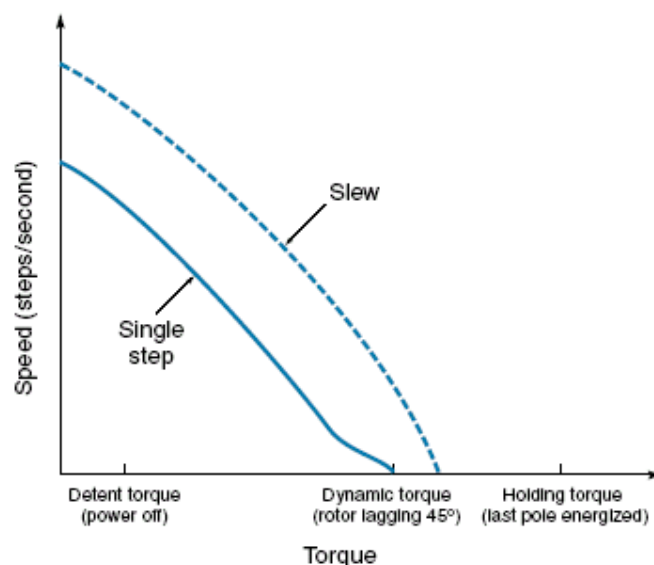


Gambar 6.3. Rotor tertunda satu step

6.2.2. Mode Operasi

Motor stepper memiliki dua mode operasi yaitu single step dan slew. Pada mode single step atau mode dua arah motor berputar dengan frekuensi yang rendah dan masih memungkinkan rotor untuk berhenti sesaat saat sampai kutub stator. Untuk setiap step sudutnya terlampaui sesaat kemudian berhenti atau berosilasi sebelum diam. Mode single step ini memiliki keuntungan setiap step tidak tergantung pada step yang lain sehingga motor bisa langsung stop atau langsung berganti arah. Kelemahannya adalah lambat dan tersendat-sendat. Misal kecepatan mode single step adalah 5 step per detik maka akan membuat putaran 15 rpm menjadi 15° per step.

Pada mode slew atau mode arah tunggal frekuensi rotor cukup tinggi sehingga rotor tidak punya waktu untuk berhenti. Pada mode ini motor berputar dengan torsi terus menerus secara kontinu seperti putaran motor DC. Pada mode slew ini motor tidak dapat berhenti tiba-tiba atau berganti arah tiba-tiba. Jika dipaksakan berhenti maka rotor akan berputar beberapa step lebih jauh baru berhenti. Sehingga perhitungan step menjadi tidak tepat. Untuk mengatasinya pengatur harus tahu kapan mode slew akan berakhir dan harus menurunkan kecepatannya saat akan berakhir.



Gambar 6.4. Kurva Torsi – kecepatan pada single mode dan slew mode

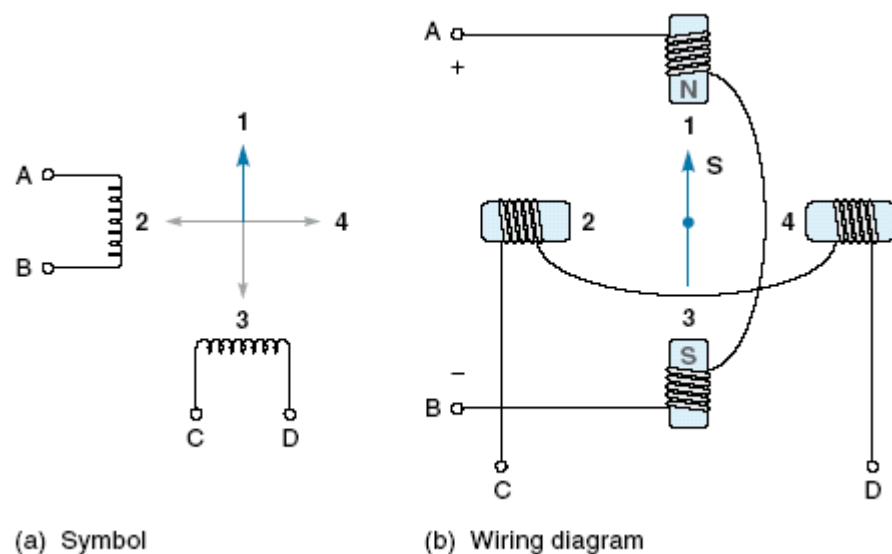
Kurva antara torsi dan kecepatan diperlihatkan pada gambar 6.4. Detent Torque adalah torsi yang diperlukan untuk membangkitkan gaya pada magnet permanen (rotor) diawal pemberian daya. Yaitu hentakan kecil saat anda memutar motor secara manual saat motor tidak diberi daya. Dynamic Torque adalah torsi putar maksimum saat rotor tertinggal setengah step terhadap kutub medan. Holding torque adalah torsi stall terbesar saat motor sudah berhenti tetapi medan terakhir masih diberi energi.

6.2.3. Mode Eksitasi untuk PM Motor Stepper

Motor stepper memiliki beberapa kombinasi lilitan dan rotor. Terdapat beberapa urutan energi pada lilitan medan yang menentukan jumlah lilitan yang terpisah, yang dinyatakan dengan phase

6.2.3.1. Two Phase (Bipolar) Stepper Motor

Two-Phase (bipolar) stepper motor memiliki dua rangkaian lilitan dengan 4 kutub medan. (Gambar 6.5)



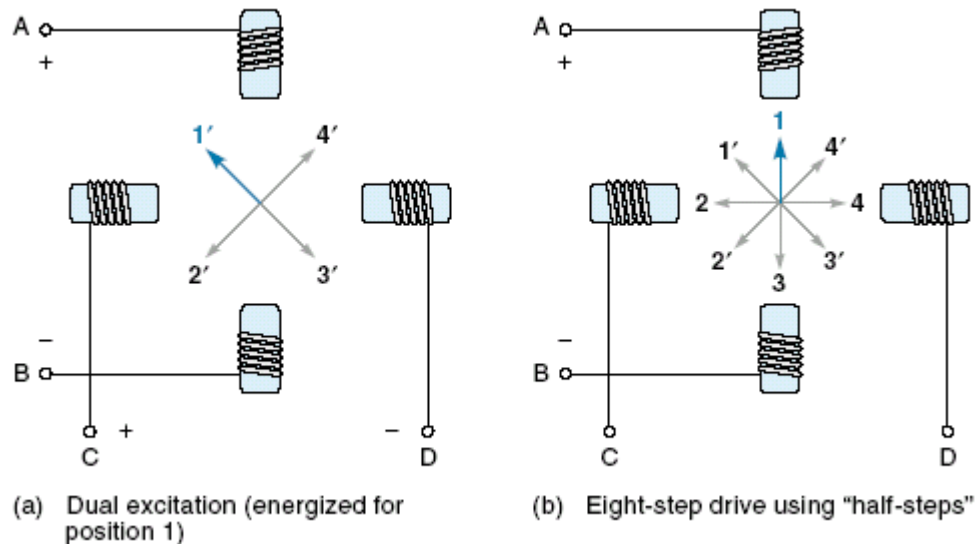
Gambar 6.5. Two-Phase (Bipolar) Stepper Motor

Disebut bipolar karena arus yang mengalir pada lilitan bisa sewaktu-waktu berubah polaritas. Lilitan AB jadi satu pada saat A positif dan B negatif maka rotor akan ada pada posisi 1. Jika diinginkan motor berputar berlawanan arah jarum jam maka setelah AB diberi energi, aliran AB dihentikan dan lilitan CD diberi energi dengan polaritas C positif dan D negatif sehingga rotor ada pada posisi 2 untuk memutar ke posisi 3 maka lilitan CD alirannya diberhentikan dan lilitan AB diberi energi lagi tapi sekarang dengan polaritas yang berlawanan. Untuk berputar berlawanan arah jarum jam maka susunan eksitasi single mode adalah sebagai berikut:

Circuit	Position
A+ B-	1
C+ D-	2
A- B+	3
C- D+	4

Cara yang lain adalah dengan memberi aliran pada kedua rangkaian AB dan CD secara bersamaan sehingga rotor berada pada posisi diantara kutub-kutub. Urutan eksitasi dual mode ini adalah sebagai berikut:

Circuits	Position
A+ B- and C+ D-	1'
A- B+ and C+ D-	2'
A- B+ and C- D+	3'
A+ B- and C- D+	4'

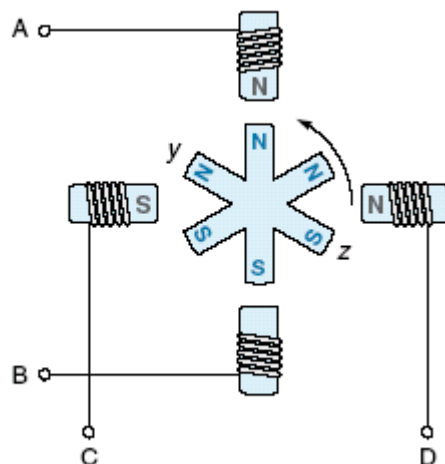


Gambar 6.6. Mode Operasi tambahan

Kedua cara single mode dan dual mode ini memberikan 4 step. Memberikan arus listrik sekaligus pada kedua rangkaian menyebabkan torsiya lebih kuat daripada single mode tetapi lebih banyak energi yang dikonsumsi.

Cara lain dengan memberikan setengah step maka akan diperoleh 8 step (Gambar 6.6). Posisi 1, 2, 3 dan 4 diperoleh dari single mode sedangkan posisi 1', 2', 3' dan 4' diperoleh dari dual mode.

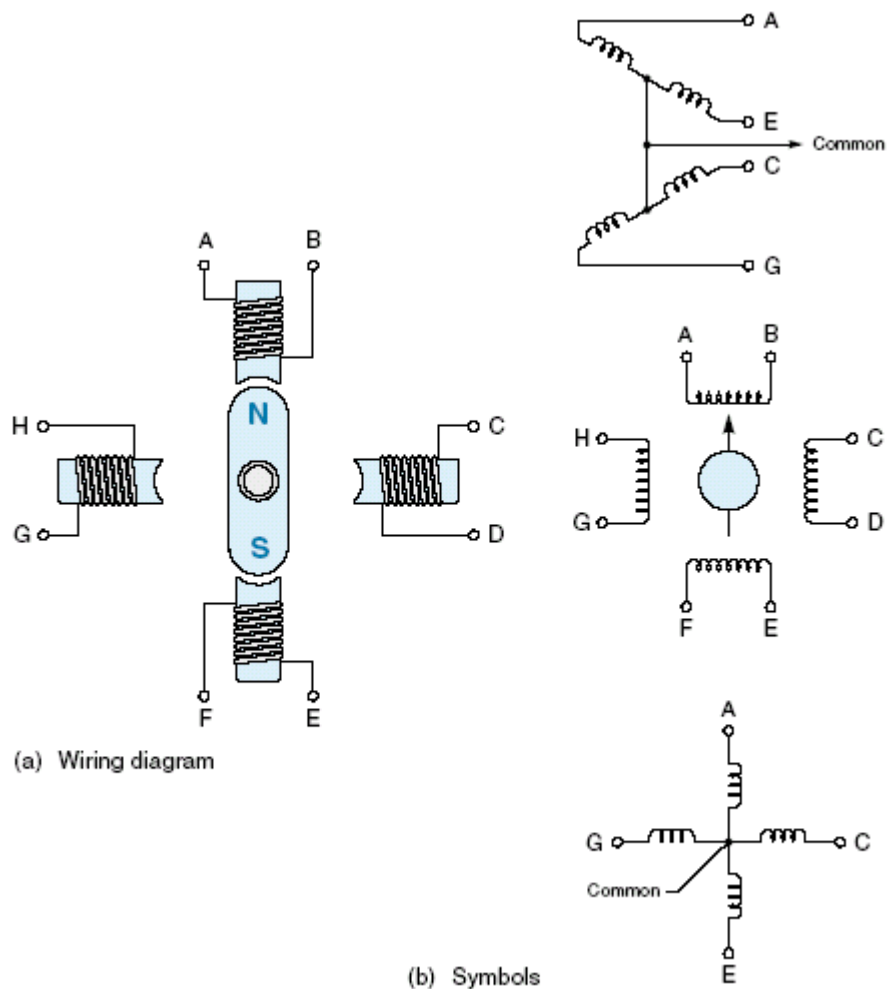
Pada rotor yang jumlah kutubnya lebih banyak akan diperoleh ukuran step yang lebih kecil. Misal motor stepper dengan 6 rotor akan menghasilkan step sebesar 30°.



Gambar 6.7. Motor 30° dengan 6 kutub rotor

6.2.3.2. Four Phase (Unipolar) Stepper Motor

Jenis ini paling sering digunakan, kata four phase berarti motor stepper ini mempunyai 4 lilitan dan kata unipolar berarti arah arus pada setiap lilitan selalu sama polaritasnya tidak pernah berubah.

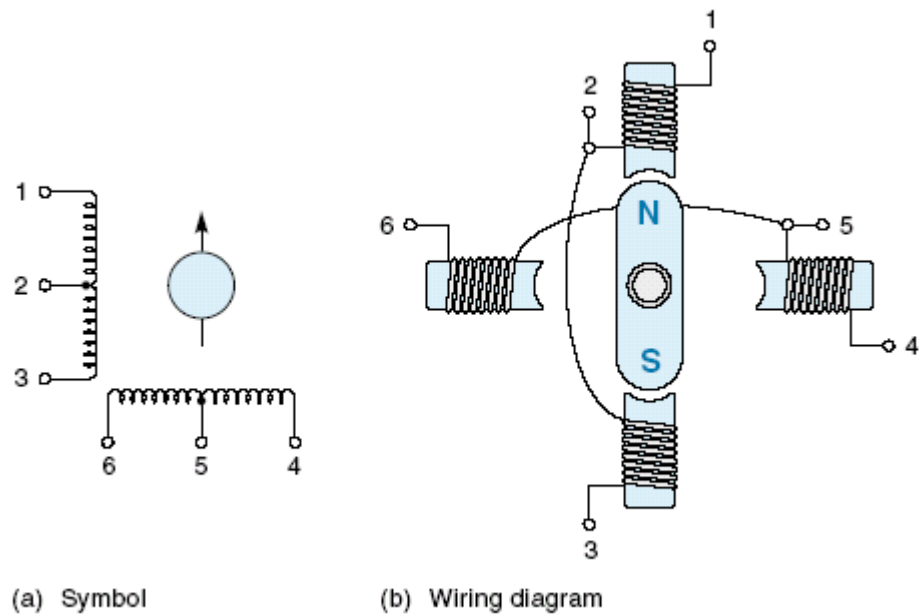


Gambar 6.8. Four Phase (Unipolar) Stepper Motor

Untuk memutar Four-Phase Stepper Motor pada arah searah jarum jam urutan stepnya adalah

A	B
C	D
E	F
G	H

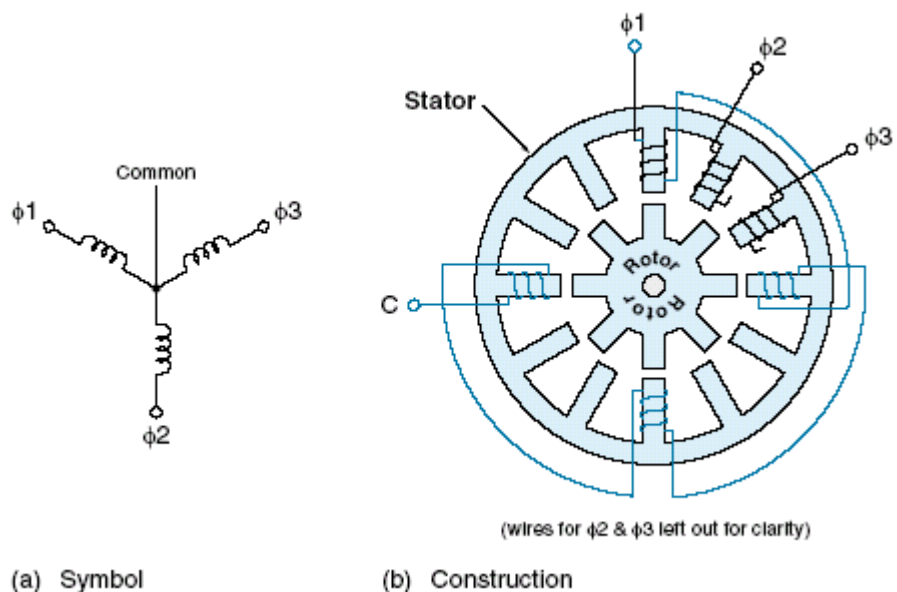
Biasanya suatu Four-phase stepper motor dapat dioperasikan sebagai two phase sekaligus menggunakan perangkat center tap (Gambar 6.9). Saat ingin dibuat two phase, center tap (terminal 2 dan 5) tidak dihubungkan sedangkan saat ingin dibuat menjadi four-phase terminal 2 dan 5 dihubungkan dengan ground.



Gambar 6.9. Four-Phase Stepper Motor

6.3. Variable-Reluctance Stepper Motor

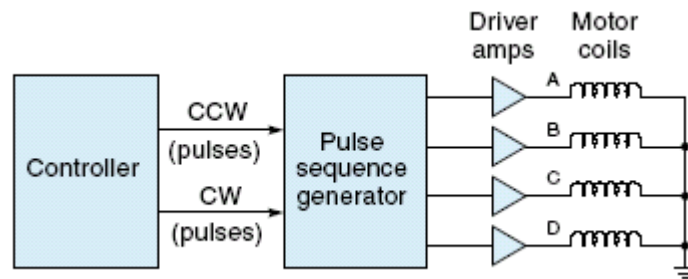
Variable-Reluctance (VR) Stepper Motor pada rotornya tidak menggunakan magnet tetapi sebagai gantinya digunakan roda beri bergerigi (Gambar 6.10b)



Gambar 6.10 Variable-Reluctance Stepper Motor

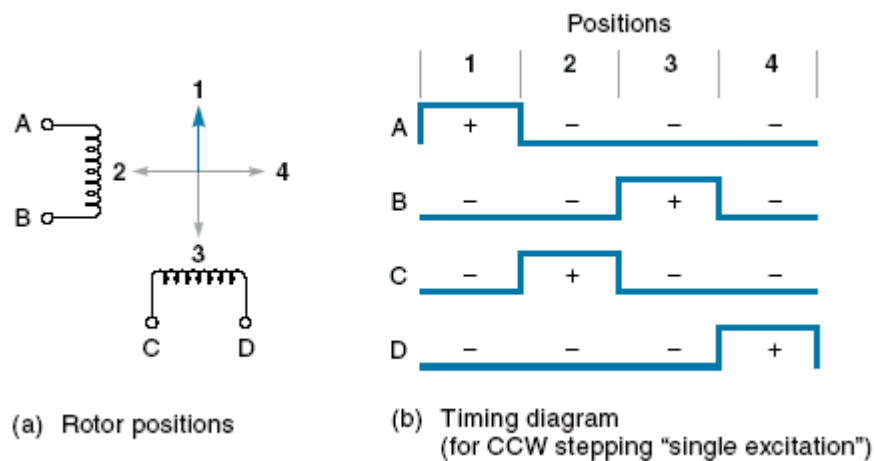
6.4. Rangkaian Penggerak Pengontrol Motor Stepper

Rangkaian penggerak terdiri dari sebuah pengatur (controller) yang menentukan jumlah dan arah dari step (CCW=Counter Clock wise, CW=clock wise). Sedangkan Generator pulsa membangkitkan pulsa yang sesuai untuk masing-masing lilitan sesuai dengan arah dan besar step yang diinginkan. Motor stepper tidak memerlukan operasional amplifier karena hanya biasanya digunakan secara digital yaitu penyalan on/off saja.



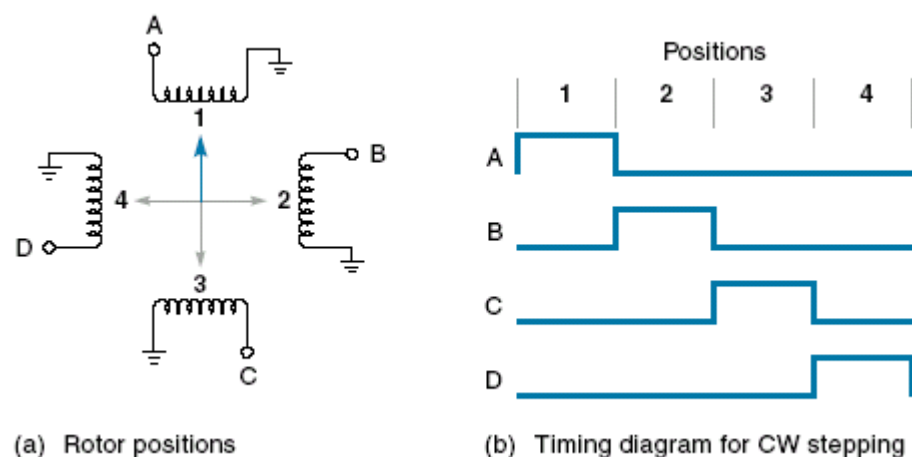
Gambar 6.11. Penggerak Motor Stepper

Untuk menggerakkan two phase (bipolar) stepper motor berlawanan arah jarum jam (CCW) digunakan timing diagram pada gambar 6.12. Misal untuk posisi rotor di 1 maka kutub A diberi polaritas positif dan kutub B negatif sehingga mengalir arus sedangkan kutub C dan D diberi polaritas negatif atau rangkaiannya menjadi off.



Gambar 6.12 Posisi rotor dan timing diagram two phase stepper motor

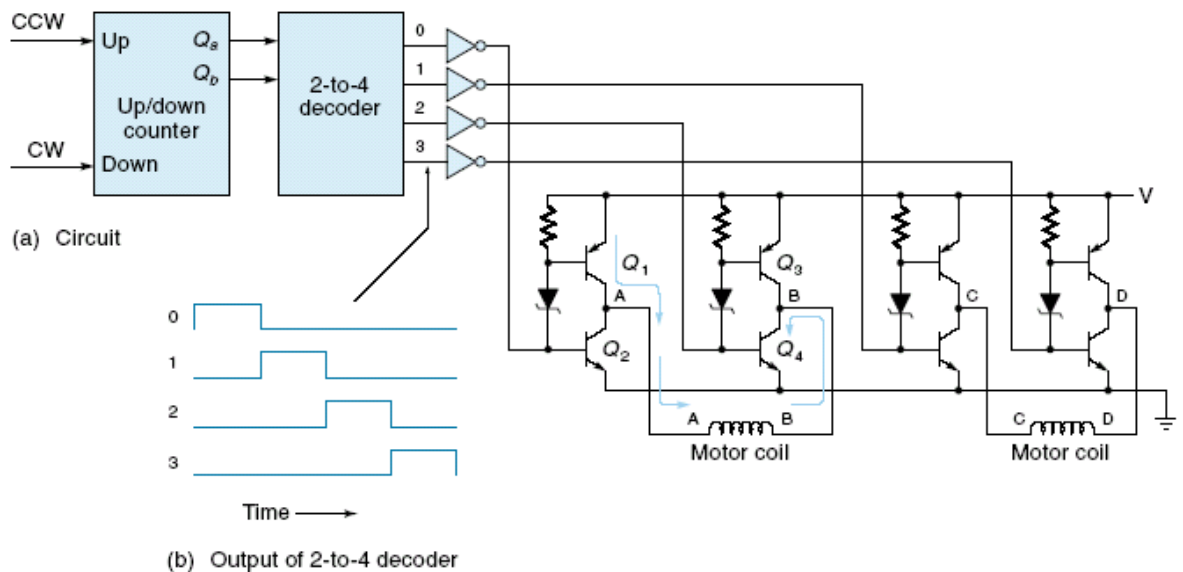
Sedangkan timing diagram untuk four-phase dapat dilihat pada gambar 6.13.



Gambar 6.13. Posisi rotor dan timing diagram four-phase stepper motor

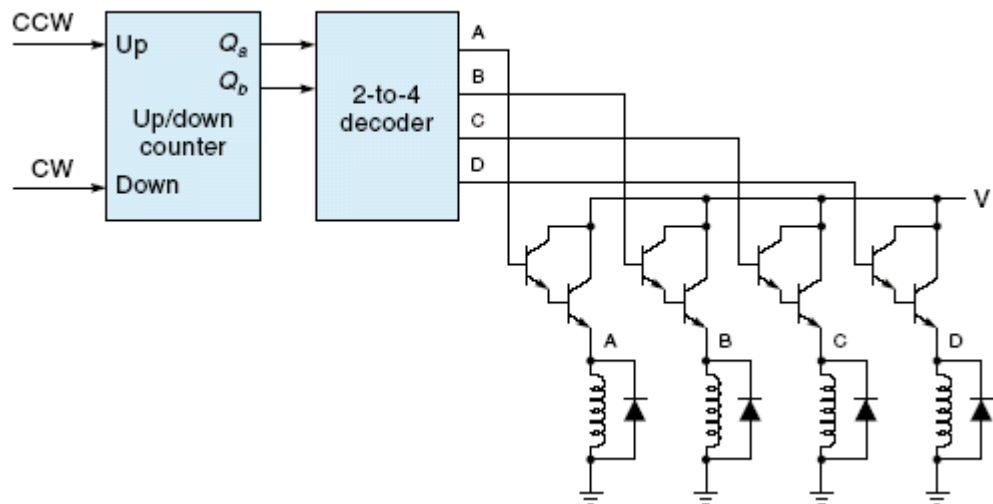
Untuk membuat timing diagram seperti pada gambar 6.12 dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian digital (Gambar 6.14) yang menghasilkan posisi naik (UP) dan posisi pulsa turun (DOWN). Setiap timing diagram ini dinyatakan dengan pulsa digital menggunakan 2 to 4 decoder yang

menghasilkan keempat timing diagram dinyatakan dengan salah satu dari nilai 00, 01, 10, 10 dan 11. Output dari decoder harus diinverting dan dihubungkan ke rangkaian transistor simetri. Resistor dan zener membuat transistor UP menjadi on pada saat keluaran OFF dan sebaliknya



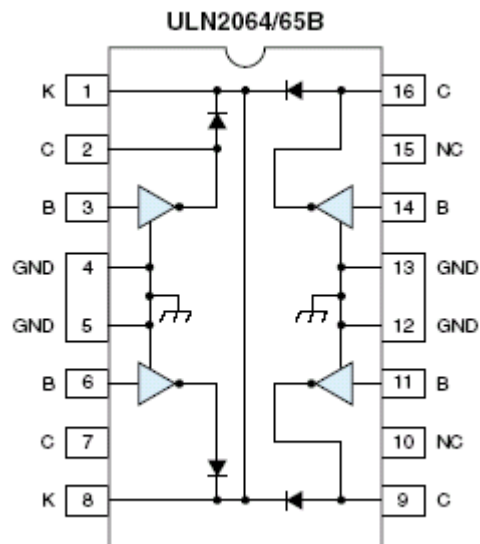
Gambar 6.14. Rangkaian lengkap penggerak two-phase stepper motor

Rangkaian untuk four-phase stepper motor mirip dengan gambar 6.14 tetapi pada keluaran decoder tidak perlu ditambahkan inverting lagi. Keluaran dari decoder dihubungkan ke 4 penguatan darlington.



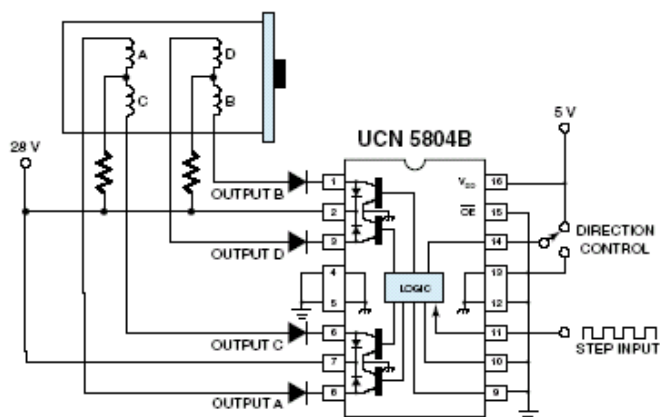
Gambar 6.15 Rangkaian lengkap penggerak four-phase stepper motor

Biasanya keempat penguat Darlington sudah tersedia di dalam IC Allegro ULN-2064/65B. Penguat ini dapat disuplai sampai 1,5 A dan digerakkan langsung dari TTL 5V logika. Dioda sebagai tempat pembuangan arus saat transistor off.



Gambar 6.16. IC Allegro ULN-2064/65B

Contoh lain adalah Allegro UCN-5894B yang memiliki tiga mode pengoperasian.



(a) Driver circuit

WAVE-DRIVE SEQUENCE					
Half Step = L, One Phase = H					
Step	A	B	C	D	
POR	ON	OFF	OFF	OFF	DIRECTION = L 1
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	DIRECTION = H 1

TWO-PHASE DRIVE SEQUENCE					
Half Step = L, One Phase = L					
Step	A	B	C	D	
POR	ON	OFF	OFF	ON	DIRECTION = L 1
1	ON	OFF	OFF	ON	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	ON	OFF	
4	OFF	OFF	ON	ON	DIRECTION = H 1

HALF-STEP DRIVE SEQUENCE					
Half Step = H, One Phase = L					
Step	A	B	C	D	
POR	ON	OFF	OFF	OFF	DIRECTION = L 1
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	DIRECTION = H 1
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

(b) Modes of operation

Gambar 6.17. Rangkaian UNC-5894B Penggerak Unipolar Stepper Motor

Daftar Pustaka:

- Wolfgang Link, (1990), Pengukuran, Pengendalian dan Kontrol dengan PC, Elex Media Komputindo
- Agfianto Eko Putra, (2004), Teknik Antarmuka Komputer : Konsep dan Aplikasi, Graha Ilmu
- Kilian, (2005), Modern Control Technology 2nd Edition: Component & System, Delmar, 2005

Tentang Penulis

Yeffry Handoko Putra mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada tahun 1996 dari Departemen Teknik Fisika Insitut Teknologi Bandung dengan predikat sangat memuaskan. Pada tahun 1999 mendapatkan gelar Magister Teknik dari Program Studi Magister Instrumentasi dan Kontrol, Institut Teknologi Bandung dengan predikat Cum-Laude. Pada tahun 2009 mendapatkan gelar Doktor dari Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung dengan pedikat Cum Laude. Pada tahun 2008 mendapatkan pendidikan singkat non gelar di Universitas Essex, Colchester, UK selama satu semester di bidang sensor bawah air. Saat ini penulis menjadi dosen tetap di Jurusan Teknik Komputer, Universitas Komputer Indonesia, Bandung.