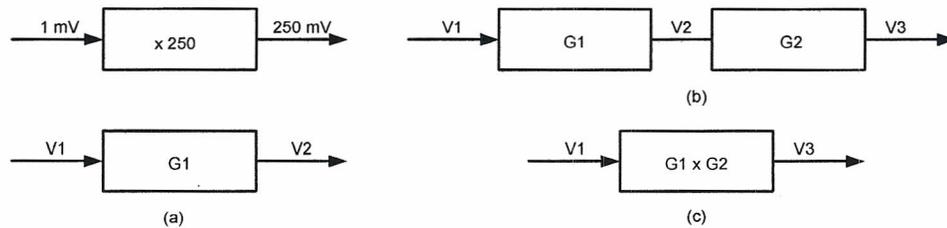


## BAB II

### RAGAM PENGUAT DALAM SISTEM KENDALI

#### 1. Penguat Operasi

Hubungan antara sinyal masukan dan sinyal keluaran sebuah elemen penguat (*amplifier*) dapat dijelaskan melalui bentuk diagram blok seperti ditunjukkan pada Gambar II.1. Disini  $V_1$  sebagai sinyal masukan,  $V_2$  dan  $V_3$  sebagai sinyal keluaran dan  $G$  sebagai penguatan (*gain*).

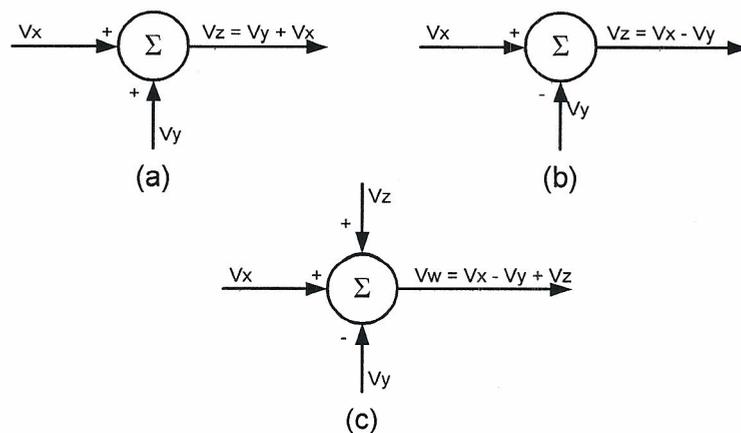


**Gambar II.1. Diagram Blok Penguat (a) Satu Tingkat (b) Dua Tingkat, dan (c) Hasil Penyederhanaan.**

Dari Gambar II.1.a. besar penguatan  $G_1 = V_2/V_1 = \text{konstanta}$ . Bila  $V_1 = 1\text{mV}$  dan  $G_1 = 250$ , maka  $V_2 = V_1 \times G_1 = 1 \times 250\text{mV}$ . Pada penguat dua tingkat (Gambar II.1.b.), dimisalkan  $V_1$  tetap =  $1\text{mV}$  dan  $G_1 = G_2 = 50$ . Jadi sinyal keluaran  $V_3 = V_1 \times G_1 \times G_2$  atau  $V_3 = 1 \times 50 \times 50 = 2500\text{ mV} = 2,5\text{ V}$ . Seandainya  $G_2$  berupa potensiometer pembagi (*divider*), maka penguat  $G_2$  akan lebih kecil dari 1, yaitu  $G_2 = 0,5$ . Dengan demikian  $G_1 \times G_2 = 50 \times 0,5 = 25$  berarti sinyal keluaran  $V_3 = 1 \times 50 \times 0,5 = 25\text{ mV}$ . Dari contoh terakhir ini mudah dipahami bahwa komponen aktif sebagai penguat (*amplifier*) dan komponen pasif sebagai pelemah (*attenuator*).

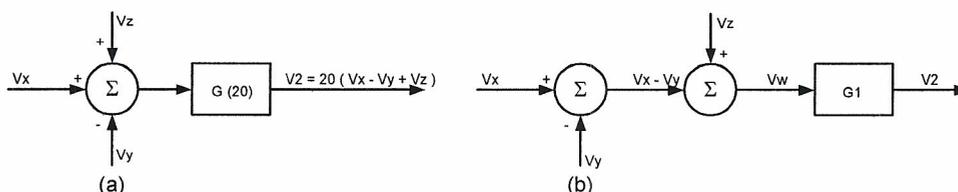
Untuk pemakaian elemen penguat lebih dari satu buah, biasanya dilukiskan dengan sebuah bulatan bersimbol  $\Sigma$  (*sigma*) yang berarti penghubung penjumlahan atau *summing junction*. Dalam prakteknya  $\Sigma$  ini dapat berupa penjumlahan, pengurangan, dan kombinasi dari keduanya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 2.

Dari Gambar II. 2.c. Sinyal keluaran  $V_w = V_x - V_y + V_z$



**Gambar II.2. “Summing Junction “ (a) Penjumlah (b) Pengurang (c) Penjumlahan > 3 Input (Kombinasi).**

Jika terminal keluaran diumpamakan ke terminal masukan sebuah penguat A, maka Gambar II.2 dapat disederhanakan menjadi seperti pada Gambar II.3.a. Sementara bila terdapat dua buah “*summing junction*” penyederhanaannya menjadi seperti pada Gambar II.3.b.

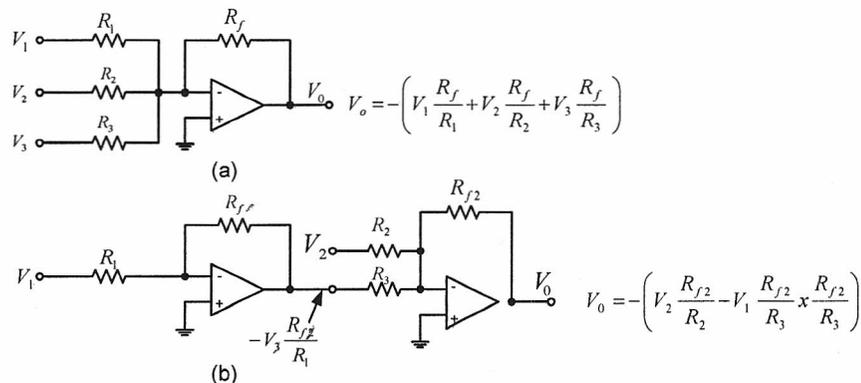


**Gambar II.3. (a) Sebuah “Summing Junction“ dengan Penguat (b) Dua Buah “Summing Junction dengan Penguat**

Dari Gambar II.3.a., sinyal keluaran  $V_2 = V_w \times G_1 \times (V_x - V_y + V_z)$ . Seandainya  $G_1 = 20$ ,  $V_x = -1V$ ,  $V_y = -2V$  dan  $V_z = 2V$ , maka  $V_w = [-1 - (-2) + 2] = 3V$ . Jadi  $20 \times 3 = 60V$ .

Perlu diketahui bahwa yang telah diuraikan di atas adalah merupakan salah satu bentuk penyelesaian yang terdiri dari beberapa buah “*Summing Junction*”, yang dalam prakteknya dapat berupa penguat operasi (*operational amplifier*). Penguat operasi yang sering digunakan sebagai piranti kendali ini banyak macamnya, seperti penguat operasi penjumlah, penguat beda, *komparator*, *integrator*, *diferentiator* dan penguat operasi lainnya.

Penguat operasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 4 adalah salah satu contoh yang banyak dijumpai dalam sistem kendali. Penguat operasi yang kedua terminal masukannya baik “*inverting*” maupun “*non-inverting*” digunakan secara serempak berperan sebagai penguat beda (*difference amplifier*). Sebaliknya, apabila salah satu terminal saja yang digunakan sebagai jalan masukan, namanya penguat penjumlah (*summer=adder*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 4.a. Akan tetapi jika dua buah penguat penjumlah yang memakai dua terminal masukan terpisah (Gambar II. 4.b.) adalah penguat pengurang (*subtractor*).



**Gambar II. 4. Penguat Operasi (a) Penjumlah (b) Pengurang.**

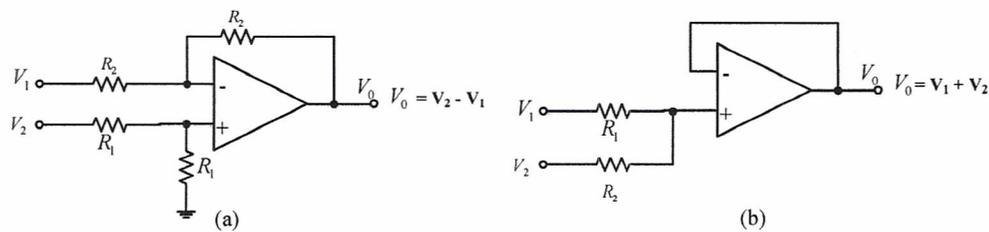
Sinyal keluaran dari penguat operasi penjumlah diformulasikan sebagai :

$$V_o = -\left( V_1 \frac{R_f}{R_1} + V_2 \frac{R_f}{R_2} + V_3 \frac{R_f}{R_3} \right)$$

Adapun sinyal keluaran dari penguat operasi pengurang adalah :

$$V_o = -\left( V_2 \frac{R_{f2}}{R_2} - V_1 \frac{R_{f2}}{R_3} \times \frac{R_{f2}}{R_3} \right)$$

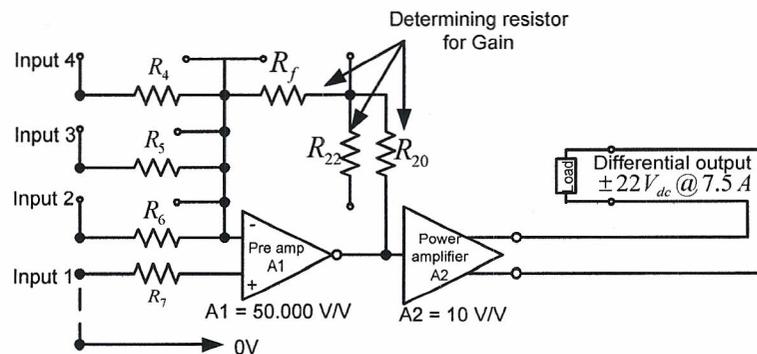
Rangkaian penguat beda (*differential amplifier*) di atas berperan sebagai penjumlah dapat juga sebagai pengurang. Rangkaian penguat beda jenis pengurang memiliki ciri khusus, yaitu kedua terminal masukannya mendapat sinyal luar ( $V_1$  dan  $V_2$ ) secara serempak lengkap dengan tahanan umpan-balik  $R_f$ . Sementara penguat penjumlah digunakan satu terminal saja yaitu *non-inverting* dengan  $R_f = 0$  (dihubung singkat). Kedua jenis rangkaian penguat tersebut ditunjukkan pada Gambar II. 5.



**Gambar II. 5. Penguat Operasi Beda (a) Pengurang (b) Penjumlah.**

Semua rangkaian operasi sebagaimana yang telah dijelaskan di atas sering sekali digunakan pada pengendali sistem servo. Penguat yang digunakan dalam pengendali sistem servo ini lazim disebut penguat servo atau “*servo amplifier*.”

Penguat servo umumnya dibagi dalam dua bagian, yaitu penguat awal (*pre-amplifier*) dan penguat daya (*power amplifier*) yang langsung mencatu motor servo itu sendiri. Penguat daya ini harus disesuaikan dengan spesifikasi beban yang dikendalikan, seperti arus, tegangan dan frekuensi yang diperlukan. Penguat daya ini umumnya mampu menghasilkan respons frekuensi hingga 1000 Hz dari sumber tegangan DC melalui sebuah “*chopper*”. Bangunan penguat servo secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar II. 6.

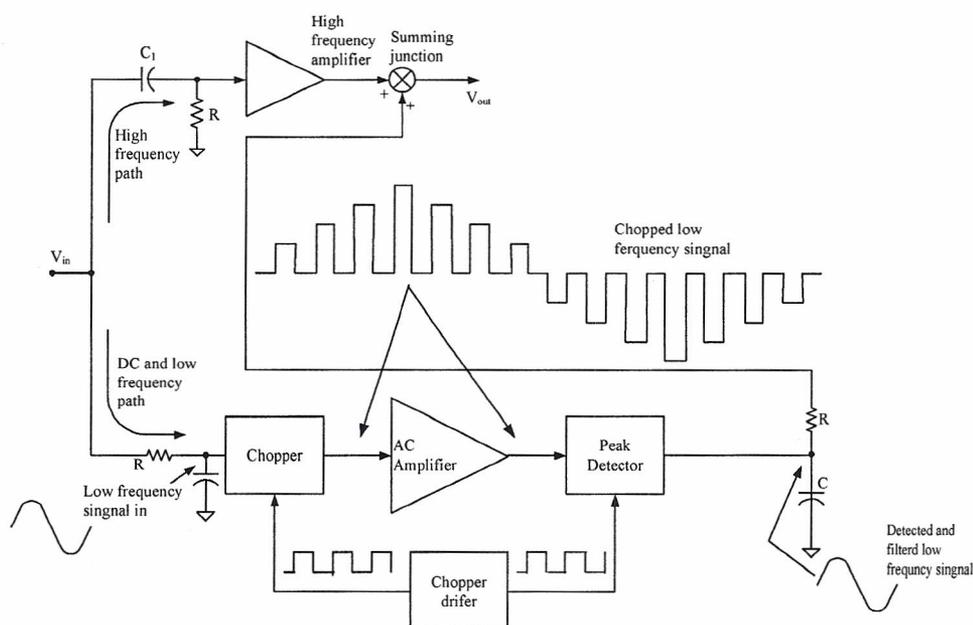


**Gambar II. 6. Bangunan Penguat Servo Sederhana.**

Biasanya respons frekuensi, daya yang dihasilkan, besar penguat dan komponen-komponen kompensator lainnya telah didesain sebelum dirakit dalam satu sistem. Untuk pemakaian daya rendah dapat digunakan jenis “*Complementary Symetry*” jenis *push-pull* kelas B. Penguat servo dapat digunakan untuk mencatu beban dengan daya keluaran 5 kWatt, asalkan kondisi tegangan dan temperaturnya setiap saat terjaga konstan. Guna menghindari timbulnya

variasi arus maupun tegangan akibat pengaruh temperatur (*drift*) dapat digunakan penguat “*chopper*” yang distabilkan. Penguat *chopper* ini memiliki kestabilan berkisar  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , disamping itu juga merupakan penguat umpan-balik berpenguatan tinggi dari MOSFET.

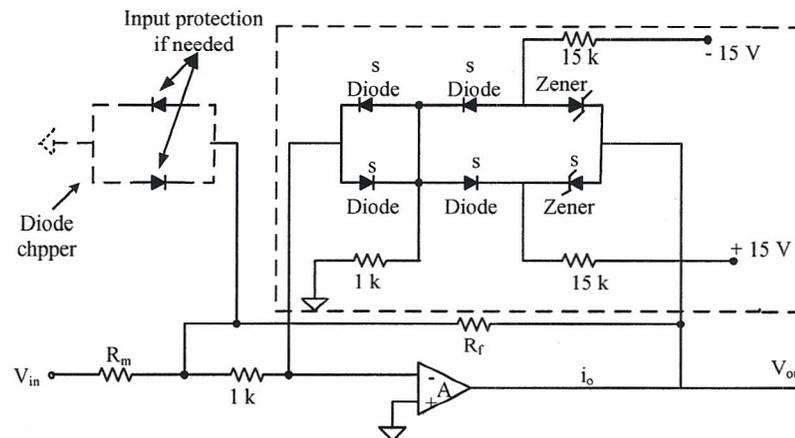
*Chopper* berfungsi untuk merubah perbedaan antara sinyal masukan dc dan sinyal umpan-balik menjadi gelombang kotak berfrekuensi tinggi tanpa “*drift*”. Selanjutnya gelombang kotak ini disearahkan dan difilter guna menghasilkan sinyal keluaran yang telah dikuatkan (lihat Gambar II. 7.).



**Gambar II. 7. Penguat *Chopper* Yang Distabilkan.**

Penguat *chopper* dalam diagram sistem bisa disederhanakan dengan sebuah penguat operasi. Sinyal masukan ( $V_{in}$ ) dipisahkan melalui dua komponen, yaitu rangkaian filter frekuensi tinggi ( $C_1$  dan  $R_1$ ) dan rangkaian filter frekuensi rendah ( $C_2$  dan  $R_2$ ). Sinyal gelombang kotak berfrekuensi rendah mengalir ke *chopper* tatkala transistor *chopper* “OFF” dan “ON” saat dialiri sinyal berfrekuensi tinggi. Adapun penguat ac diusahakan berpenguatan tinggi dengan *drift* serendah mungkin bahkan nol. Kapasitor  $C_3$  berfungsi sebagai pelatu sinyal terdeteksi yang dikeluarkan oleh *chopper*, sedangkan sinyal keluaran ( $V_o$ ) merupakan total dari sinyal terdeteksi dan sinyal dari penguat frekuensi tinggi.

Guna mengatasi terjadinya kejenuhan pada penguat, diperlukan rangkaian penangkal beban lebih, sedangkan sinyal masukan yang terlalu besar ditangkal menggunakan diode pemotong (*clipper diode*). Apabila sinyal keluaran terlalu besar dapat diblok atau direduksi dengan impedansi umpan-balik yang besar (lihat Gambar II. 8.).

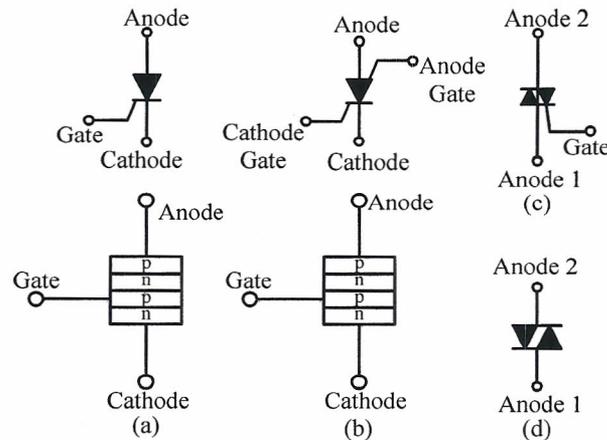


**Gambar II. 8. Rangkaian Penangkal Beban Lebih.**

Di dalam sistem kendali tertutup sesekali diperlukan juga piranti proteksi guna mengatasi perbedaan antara sinyal keluaran dan sinyal masukan (*set-Value*) selisihnya terlalu besar. Jika hal ini terjadi diharapkan piranti proteksi ini akan bekerja secara simultan dengan elemen kendalinya. Perubahan parameter yang perlu dikendalikan dapat berupa posisi poros, kecepatan sudut putar dan lain-lain, yang kesemuanya harus diumpan-balikkan ke penghubung penjumlah (*Summing Junction*). Perbedaan inilah yang diproses elemen kendali untuk mengendalikan sistem dalam keadaan yang semestinya, yaitu tanpa kesalahan yang berarti.

## 2. Penguat Thyristor (SCR).

Thyristor termasuk piranti empat lapis (PNPN atau NPNP) yang dirakit sedemikian rupa sehingga di bagian luar hanya ada tiga elektrode saja, yaitu *Gate*, *Anode*, dan *Katode*. Keluarga Thyristor adalah *Silicon Controlled Rectifier (SCR)* dan *Silicon Controlled Switching (SCS)*, disamping Triac dan Diac. Untuk membedakan keempat keluarga thyristor ini secara simbolik ditunjukkan pada Gambar II. 9.

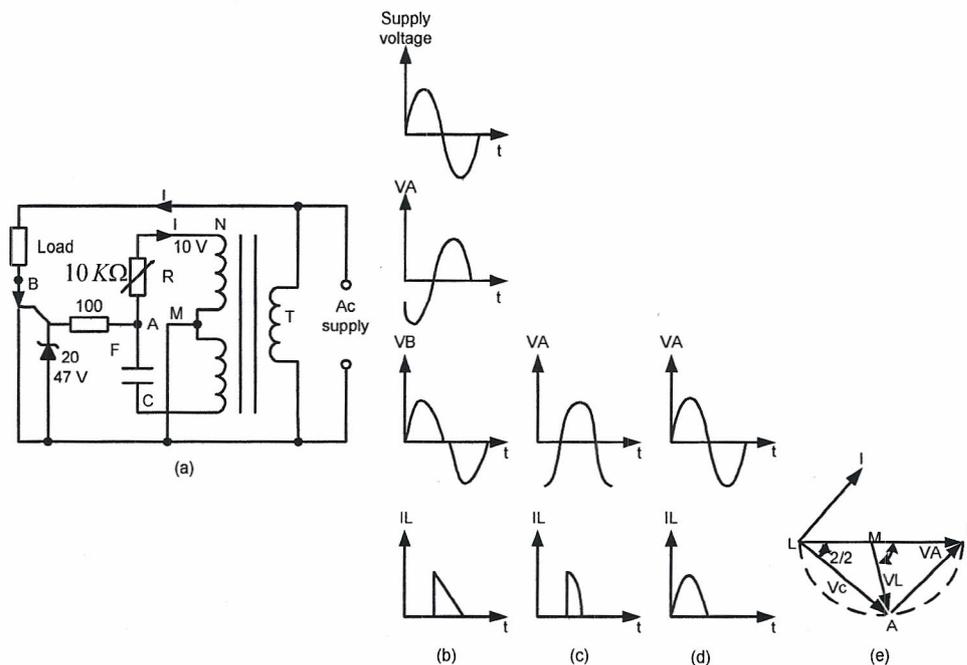


**Gambar II.9. Simbol dan Konstruksi (a) SCR, (b) SCS, (c) Triac, dan (d) Diac.**

Di dalam membahas keluarga thyristor kaitannya dengan penguat untuk sistem kendali, hanya dipilih SCR saja. Thyristor (SCR) akan aktif jika sinyal penyulut *gate* (*gate firing*) telah mencapai sama atau lebih besar dari tegangan dadal ( $V_{BO}$ ), dan sebaliknya. Dilihat dari fungsi waktu, proses mengaktifkan SCR lebih singkat ( $0,1 \mu\text{S} - 1 \mu\text{S}$ ) dari pada proses non-aktifnya yaitu  $10 \mu\text{S} - 30 \mu\text{S}$ . Salah satu keunggulan SCR adalah penyulutan terhadap *gate* dengan daya rendah (orde satuan watt), mampu menghubungkan atau mengaktifkan sebuah beban hingga orde kilowatt. Oleh sebab itu wajar jika SCR ini digolongkan dalam piranti penguat daya yang cukup besar.

Rangkaian SCR dengan kendali geseran fase R-C ditunjukkan pada Gambar II. 10.a. Nilai tahanan variabel R dapat divariasikan dari harga maksimum hingga nol, tegangan pada titik A ( $V_A$ ) dapat bergeser fase hingga  $180^\circ$ . Apabila  $V_A$  positif (*anode* berpolaritas positif), maka *gate* SCR tersulut. Namun apabila  $V_A$  tertinggal fase  $180^\circ$  dari tegangan sumbernya ini berarti berbalik fase  $180^\circ$ . Dengan kata lain tegangan kendalinya tergeser maju, bila sudut geseran fase yang tertinggal diperkecil atau dikurangi, bentuk gelombang pada beberapa titik setelah R divariasikan ditunjukkan pada Gambar II. 10.b-d.

Zener diode Dz berfungsi sebagai proteksi pertemuan *gate-katode*, karena batas tegangan *gate* saat  $V_A$  positif sebesar 4,7 Volt, dan sekaligus sebagai *shunt* saat  $V_A$  berbalik negatif.



**Gambar II.10. (a) Rangkaian SCR Dengan Kendali Geseran Fase R –C, (b) dan (c) Gelombang Keluaran Daya Rendah, (d) Keluaran Daya Penuh.**

Diagram fasor rangkaian penggeser fase ditunjukkan pada Gambar II. 10.e, dimana arus  $I$  mendahului tegangan sumbernya. Sementara tegangan  $V_R$  sefase dengan arus  $I$  dan tegangan  $V_c$  tertinggal  $90^\circ$  dibelakang  $V_R$ . Mengingat sudut fase antara  $V_R$  dan  $V_c$  selalu  $90^\circ$ , maka tempat kedudukan tegangan di titik A akan berbentuk setengah lingkaran (diameter LN).

Bila sudut fase di titik A sebesar  $X$ , yang ditentukan dari analisis  $\Delta LAN$  sebagai berikut :

$$\tan \alpha / 2 = V_R / V_c = IR / (I / \omega C) = \omega CR$$

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \omega CR.$$

Di dalam praktik, rangkaian *shunt* diode Zener pada *gate* SCR yang juga terparalel sebuah kapasitor dengan beban terpasang bersifat resistif, dapat menghasilkan perhitungan yang akurat.

**Contoh :** Analisalah besar arus rata-rata yang mengalir melalui beban  $3,39 \text{ Ohm}$  dan tegangan sumber  $240 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$  dari Gambar II. 10.a. Nilai  $R$  dan  $C$  pada

rangkaian penggeser fase ini adalah 5 KOhm dan 1  $\mu$ F. Efek pembebanan *gate* pada rangkaian tersebut untuk sementara diabaikan.

**Jawab:** Anggap tegangan *gate* untuk menyalut SCR sangat kecil dan diabaikan . Dengan demikian sudut penyulutanya adalah :

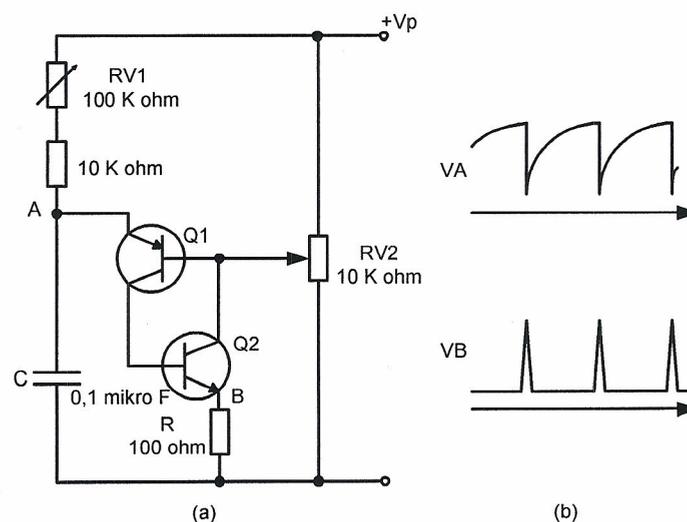
$$\begin{aligned}\alpha &= 2 \tan^{-1} (2\pi \times 50 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^3) \\ &= 2 \times 57,5^\circ = 115^\circ .\end{aligned}$$

Di sini SCR konduksi pada setengah periode positif dengan sudut antara  $115^\circ - 180^\circ$  . Persamaan tegangan sumber yang digunakan adalah :

$$240 \sqrt{2} \sin \theta = 339 \sin \theta$$

Jadi arus rata-rata pada beban adalah:

$$\begin{aligned}I_L &= \frac{1}{2\pi} \int_{115^\circ}^{180^\circ} \frac{339}{3,39} \sin \theta \cdot d\theta = \frac{100}{2\pi} [-\cos \theta]_{115^\circ}^{180^\circ} \\ &= 15,9 [(-\cos 180^\circ) - (-\cos 115^\circ)] = 15,9 (1 - 0,4226) \\ &= 9,18 \text{ A} .\end{aligned}$$



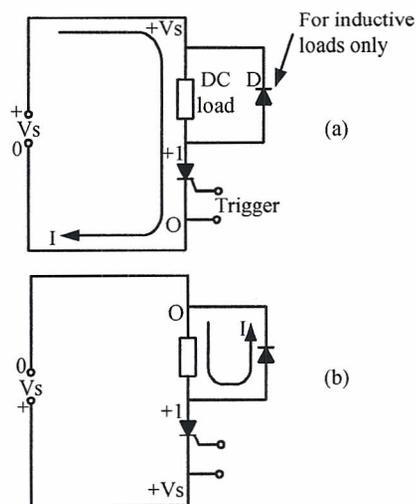
**Gambar II.11. (a) Rangkaian Pembangkit Pulsa Sederhana dan (b) Bentuk Pulsa Yang Dihasilkan.**

Sinyal penyulut thyristor (SCR) yang paling sederhana dan praktis diperoleh dari sebuah pembangkit pulsa. Pembangkit pulsa sederhana yang terdiri dari dua buah transistor komplementer dan rangkaian penggeser fase R-C ditunjukkan pada Gambar II. 2.

Manakala terjadi pelepasan muatan dari kapasitor C, potensial pada emitor  $Q_1$  nol karena basisnya positif sehingga  $Q_1$  "OFF". Dengan demikian basis  $Q_2$  terbias nol pula. Pada saat C termuati melalui  $R_{V1}$ , tegangan VA akan naik (Gambar II.2.b.) dan bila  $V_{E1}$  lebih positif dari  $V_{B1}$ ,  $Q_1$  mulai "ON". Mengingat  $I_{C1}$  juga sama dengan  $I_{B2}$ , maka  $Q_2$  juga aktif (ON), dengan pulsa berbentuk gigi gergaji ( $V_B$ ) seperti pada Gambar II.11.b.

Banyak macam generator pulsa yang dapat digunakan untuk menyulut *gate* SCR ini terutama yang dipakai di Industri seperti rangkaian *blocking* dan *monostable multivibrator*. Ada pula piranti elektromagnetik sebagai generator pulsa, namun tidak dibahas disini .

Bentuk rangkaian thyristor (SCR) lain yang khusus yang digunakan sebagai piranti pengendali beban arus searah adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.12. Bentuk gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangan sumbernya yang terpotong pada setiap setengah periode. Pemotongan ini menghasilkan faktor bentuk dan faktor daya yang murni. Jika bebannya berupa motor dc, arus dapat mendahului komutasi murninya dan pemulsaan torsinya dapat dicatat pada kecepatan rendah. Bentuk rangkaian seperti ini terbatas untuk daya kecil di bawah 2 kWatt.



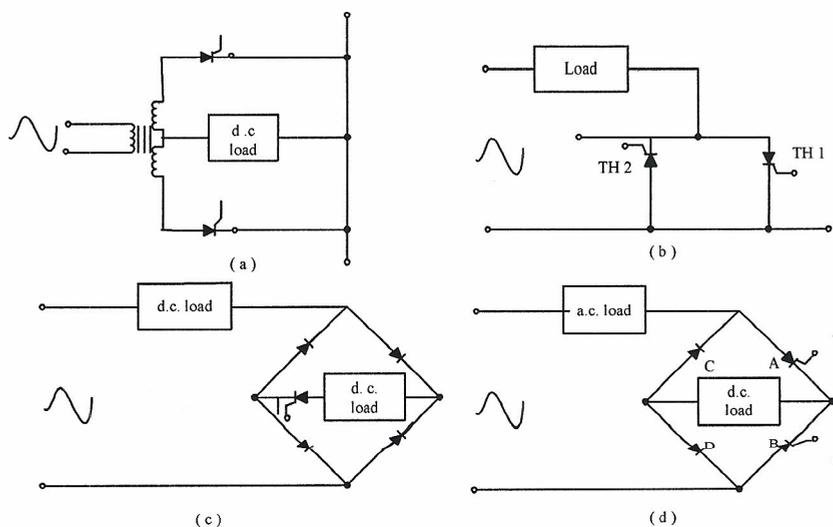
**Gambar II.12. Contoh pemakaian suatu komutasi dengan beban induktif dan resistif.** ditunjukkan pada Gambar II.12.a, sedang tegangan arah maju dari SCR

Jika bebannya bersifat resistif, SCR akan "OFF" saat tegangan anode berpolaritas negatif. Sebaliknya jika bebannya bersifat induktif arus akan mengalir terus untuk beberapa saat, sesudah itu tegangan beban akan mengatur sendiri untuk mendapatkan tegangan anode yang positif. Pada setengah periode positif, potensial pada setiap titik dari rangkaian seperti

yang *terdrop* pada beban juga sekitar 1 Volt. Sementara pada setengah periode negatif (Gambar II.12.b), tegangan *drop* pada beban saat diode konduksi adalah sekitar 1 Volt. Tegangan tersebut adalah tegangan arah mundur yang akan membuat SCR menjadi “OFF” dalam waktu sekitar 20  $\mu$  detik.

Suatu pengembangan dari rangkaian SCR gelombang penuh sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 13.a, akan tetapi rangkaian ini terlalu mahal karena diperlukan sebuah trafo. Rangkaian ini hanya khusus dipakai apabila dikehendaki bahwa beban terpasang harus terisolasi dari tegangan sumbernya. Arus ac yang melalui beban dapat dikendalikan oleh sambungan parallel 2 buah SCR yang berlawanan seperti tampak pada Gambar II. 13.b. SCR-1 akan konduksi pada setengah periode pertama, sedang SCR-2 pada setengah periode yang lain.

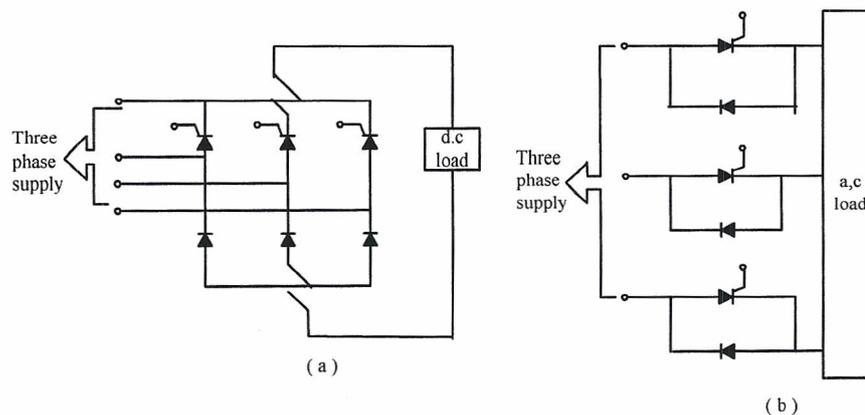
Mengingat SCR tidak mempunyai sambungan katode bersama, maka rangkaian penyulut *gate* harus terpisah dari SCR itu sendiri. Sebagai alternatif rangkaian ini dapat digunakan untuk mengendalikan beban dc seandainya arus beban dalam kondisi arah mundur. Dengan konduksinya SCR-1, arus beban mengalir dari arah kiri ke kanan melalui beban, dan arah ini akan membalik jika SCR-2 yang konduksi. Rangkaian seperti ini dapat digunakan untuk mengendalikan arus armatur pada pembalikan arah putaran.



**Gambar II.13. Model rangkaian SCR: (a) Rangkaian Gelombang Penuh; (b) Rangkaian Paralel Berlawanan ; (c) dan (d) Rangkaian Jembatan.**

Sebuah susunan rangkaian yang dapat digunakan untuk mengendalikan beban ac maupun dc ditunjukkan pada Gambar II. 13.c. SCR terhubung pada sisi dc sebuah penyearah, yang mengendalikan aliran arus pada kedua sisi (dc maupun ac) dari penyearah tersebut. Adapun rangkaian seperti ditunjukkan pada Gambar II. 13.d, pada dasarnya sama seperti pada Gambar II. 13.c., hanya saja disini dikhususkan untuk mengendalikan arus beban yang lebih besar lagi, dengan catatan bahwa kedua SCR tersebut benar-benar simetris karakteristiknya. Pada umumnya, untuk rangkaian Gambar II. 13.c., digunakan untuk mengendalikan beban berdaya sekitar 5 kWatt, sedangkan Gambar II. 13.d., mampu untuk beban berdaya sekitar 20 kWatt. Untuk rangkaian seperti Gambar II. 13.d, jika beban dc bersifat induktif akan lebih tepat bila elemen A dan C atau B dan D dipasang SCR, sementara pasangan satunya lagi dipasang diode. Melalui pemasangan seperti ini arus beban induktif akan dicatu melalui diode sementara arus dari SCR mengkomutasi ke nol secara otomatis.

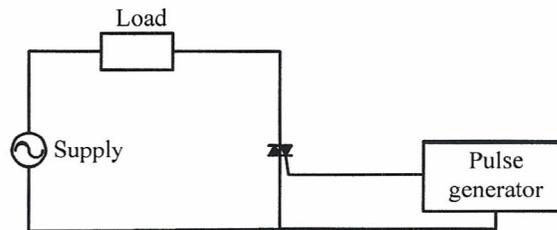
Untuk beban 3 fase ac maupun dc di atas 10 kWatt, bila digunakan rangkaian SCR seperti ditunjukkan pada Gambar II.14. (a) dan (b) akan lebih ekonomis. Pada rangkaian dc arus beban secara otomatis mengkomutasi SCR dengan tegangan *anode* yang lebih tinggi pada saat *gate* diberi pulsa penyulut.



**Gambar II. 14. (a) Rangkaian SCR Jembatan 3 Fase, (b) SCR dan Diode Terpasang Paralel Berlawanan Untuk Beban 3 Fase.**

Pada Gambar II.14.b., diode akan memberikan arus beban jalur yang lain. Rangkaian dasar pemakaian SCR (Triac) dalam konfigurasi dua arah sebagai pengendali aliran arus beban ac diilustrasikan melalui Gambar II.15.

Rangkaian ini sangat efektif digunakan sebagai pengganti rangkaian paralel berlawanan seperti pada gambar II.14.b. di atas.



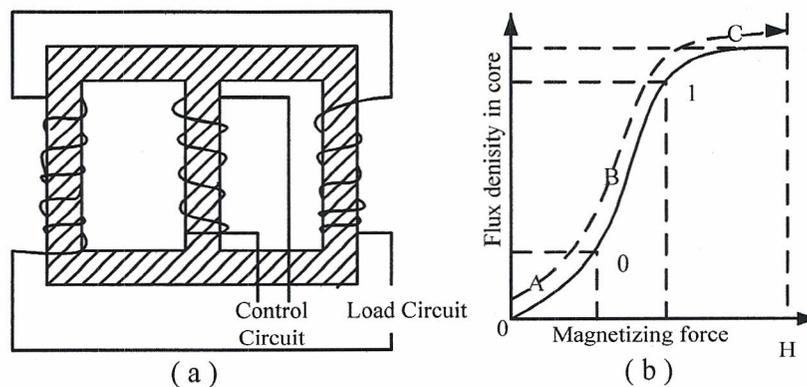
Gambar II.15. Rangkaian Dasar Triac.

### 3. Penguat Magnetik.

#### a. Reaktor Jenuh (*Saturable Reactor*)

Reaktor jenuh yang lazim disingkat transduktor memiliki konstruksi fisik sama dengan transformator. Transduktor terbagi dalam dua jenis, yaitu transduktor dengan dua kaki dan tiga kaki. Transduktor didefinisikan sebagai induktansi yang besarnya dikendalikan oleh arus searah.

Reaktor jenuh sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.16.a., terdiri dari tiga buah kaki, dua kumparan ac terhubung seri berlawanan arah  $N_1$  dan  $N_2$ , dan kumparan dc  $N_3$ . Kumparan  $N_1$  dan  $N_2$  yang dialiri arus ac terpasang pada kedua kaki bagian tepi, sedangkan  $N_3$  yang dialiri arus dc terpasang pada kaki tengah.



Gambar II.16. (a) Reaktor jenuh 3 Kaki dan (b) Karakteristiknya

Fluksi magnet arus bolak – balik pada kaki tengah arahnya berlawanan sehingga tidak terjadi gaya gerak listrik (ggl) induksi pada arus searah  $N_3$ . Hal ini

wajar karena jumlah lilitan  $N_1$  dan  $N_2$  sama dan berlawanan arah (saling meniadakan ggl induksi). Sebelum ada arus searah yang mengalir pada  $N_3$ , arus bolak – balik  $I_{ac}$  menghasilkan gaya gerak magnet sebesar  $(N_1 + N_2) I_{ac} = NI_{ac}$ . Pada kurva kemagnetan dapat dilihat bahwa  $NI_{ac}$  menghasilkan fluks sebesar  $\Phi_1$ . Perubahan fluksi  $\Phi_1$  yang besar akan membangkitkan gaya gerak listrik lawan yang selanjutnya dapat merubah nilai reaktansi induktansi yang besar pula. Apabila  $N_3$  dialiri arus searah  $I_{dc}$ ,  $NI_{ac}$  akan bergeser dari sumbu nol (keadaan-1) menuju suatu daerah magnetisasi jenuh (keadaan-2). Pada keadaan jenuh, perubahan fluksi yang kecil saja dapat membuat reaktansi induktif dari reaktor jenuh turun drastis, yaitu:  $2\pi fN \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi fL = X_L$ .

Reaktansi induktif dari reaktor dari tersebut ternyata dapat diatur pada interval yang cukup lebar, dalam hal ini mencapai 20 : 1. Dengan kata lain, reaktansi induktif sebuah reaktor jenuh dapat diubah-ubah dengan mengatur besar arus searah  $I_{dc}$  yang mengalir pada kumparan arus searah  $N_3$ . Dengan demikian, reaktor jenuh ini dapat digunakan untuk mengendalikan arus bolak-balik dengan daya yang besar. Jika reaktor jenuh ini akan digunakan untuk mengendalikan beban dc, maka perlu penyearah. Untuk keperluan ini, lazim disebut penguat magnetik (*magnetic amplifier*).

#### **b. Penguat Magnetik “Self Excited”.**

Pada sebuah penguat magnetik berbeban, tinjauan pertama difokuskan pada gaya gerak magnet (ggm) dari kumparan kendali  $N_C$  dan kumparan beban  $N_L$  serta besar arus yang mengalir didalamnya. Gaya gerak magnet dimaksud adalah :

$$I_C N_C = I_L N_L \text{ atau } I_L = I_C \cdot N_C / N_L.$$

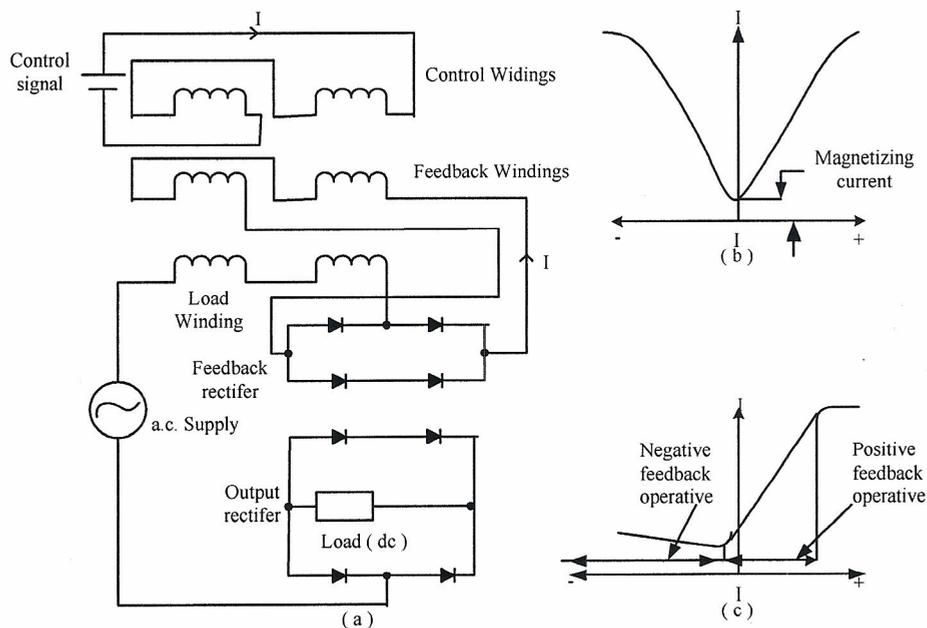
$I_C$  dan  $I_L$  adalah arus rata-rata pada kumparan kendali dan beban dengan jumlah lilitan masing-masing sebesar  $N_C$  dan  $N_L$ .

Satu problem besar yang sering dijumpai pada penguat magnetik tipe ini adalah ggl ac yang besar yang diinduksikan pada kumparan kendali dari kumparan beban yang dilewatkan trafo. Problema ini dapat diatasi dengan memasang dua buah transduktor dalam seri dengan kumparan kendali disambung berlawanan arah seperti ditunjukkan pada Gambar II.17.

Dengan menambahkan sepasang kumparan yang disebut kumparan umpan-balik  $N_F$ , penguatan yang melampaui daerah linier dapat dengan mudah dimodifikasi. Jika dikenai umpan-balik positif, penguat akan bertambah besar dan berkurang atau mengecil dikenai umpan-balik negatif. Kumparan umpan-balik  $N_F$  akan mengalirkan arus beban  $I_L$ . Pada saat gaya gerak magnet pada inti transduktor nol, umpan-balik positif memberikan ggm sebesar :

$$I_c N_c = I_L N_F = I_L N_L \text{ atau } I_L = \frac{I_c N_c}{N_L - N_F}$$

$$= I_c \cdot \frac{N_c}{N_L} \cdot \frac{1}{(1 - N_F/N_L)} ; \text{ akan } > \text{ dari } I_c \cdot N_c / N_L.$$



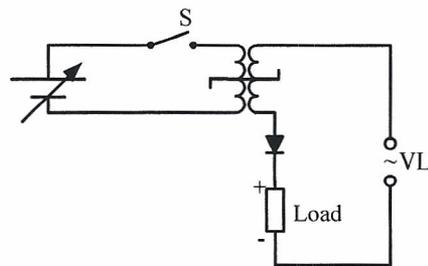
**Gambar II.17. (a) Penguat Magnetik "Self-excited" Berumpan Balik Dengan Beban DC, (b) karakteristik tanpa umpan-balik, dan (c) dengan umpan-balik**

Di sini berarti bahwa faktor penguatan adalah  $1 / (1 - N_F / N_L)$ . Adapun umpan-balik negatif akan memberikan arus kendali balik, karena arus kumparan pada umpan-balik tidak diubah. Dengan demikian faktor penguat hanya dapat diperbesar hingga batas arus kendali saat dikenai "positif feedback".

### c. Penguat Magnetik “Self-Saturating”.

Metode pengendali berikut berasal dari hukum induksi elektromagnetik yang menyatakan bahwa gaya gerak listrik yang diinduksikan tergantung pada besarnya perubahan fluksinya. Sebagai contoh, perubahan fluksi adalah tergantung pada hasil kali tegangan dan waktu yang diserap oleh kumparan. Oleh sebab itu pemakaian tegangan positif untuk waktu yang tak terhingga dapat menaikkan fluksi pada arah positif, sedang tegangan negatif dapat menaikkan fluksi pada arah negatif.

Gambar II. 18. menunjukkan rangkaian penguat magnetik “self-saturating” sederhana. Apabila saklar S terbuka, fluksi inti pada setengah periode positif dari  $V_L$  akan bertambah besar hingga dicapai titik jenuh. Pada setengah periode negatif, diode terbatas mundur dan tidak ada tegangan yang tersimpan dalam reaktor. Akhirnya fluksi tidak dapat di “reset” dan inti tetap dalam keadaan jenuh.



**Gambar II. 18. Penguat Magnetik “Self-Saturating” Setengah Gelombang.**

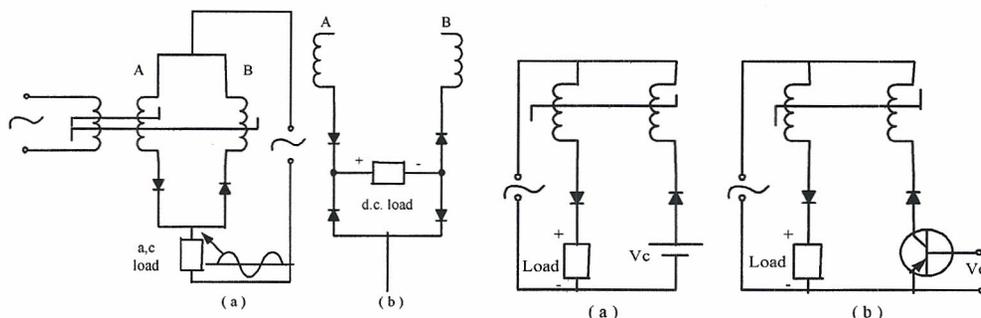
Dengan me “reset” fluksi inti kumparan kendali pada setengah periode negatif, maka sudut fase konduksi beban pada setengah periode positif beserta arus bebannya dapat dikendalikan dengan akurat.

Me “reset” sebagaimana dijelaskan di atas dalam prakteknya dapat dilakukan dengan menutup saklar S. Besarnya fluksi saat “reset” sangat tergantung pada tegangan kendali  $V_c$ , kurve B-H dari inti reaktor dan banyaknya lilitan pada kumparan kendali.

Rangkaian penguat magnetik gelombang penuh dengan tegangan keluaran ac ditunjukkan pada Gambar II.19.a. Pada setengah periode positif, arus beban mengalir melalui A, sedangkan B dalam kondisi “reset”. Sebaliknya saat setengah priode negatif transduktor B mengalirkan arus beban, sedangkan A dalam kondisi

“reset“. Rangkaian tersebut dapat dimodifikasi untuk menghasilkan tegangan keluaran dc sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 19.b.

Metode pengendali sederhana yang lain, yaitu seperti pada Gambar II. 19., yang ditambah dengan memasang dua diode *shunt* polaritas berlawanan dan sebuah tahanan, sehingga saat setengah periode negatif tegangannya akan me “reset“ fluksi inti. Metode ini disebut pengendali fluksi bocor (*leakage control*).



**Gambar II. 19. Penguat Magnetik Gelombang Penuh Untuk:**  
(a) Keluaran AC dan (b) Keluaran DC .

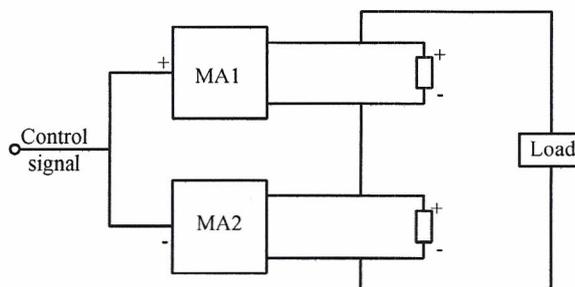
**Gambar II.20. Dua Metode Pengendalian Aksi Reset Dari Penguat Magnetik.**

Pada Gambar II.20, fluksi di “reset“. Oleh tegangan kendali  $V_c$  pada saat setengah periode negatif. Metode ini disebut pengendali gaya gerak listrik (*emf control*). Tegangan ac pada fase yang berlawanan dengan fase tegangan catunya dapat juga menggunakan baterai di tempat.

Gambar II.20.b. menunjukkan rangkaian pengendali fluksi bocor yang lain, yaitu menggunakan transistor. Tegangan aktif maupun jenuh antara Basis dan Emiter akan lebih akurat untuk mengatur waktu agar didapat arus magnetisasi yang cukup dalam rangkaian resetnya. Apabila waktu tersebut telah dicapai , fluksi inti akan mulai “reset“. Pada saat ini, transistor konduksi dan mengalirnya arus pada kumparan reaktor melalui diode. Fungsi transistor disini seolah-olah mirip dengan sebuah katub yang bekerja membuka dan menutup bergantian secara periodik.

Persyaratan yang harus dipenuhi dalam dasar sistem pengendali arus searah ini, yaitu polaritas keluaran penguat daya harus dapat bergantian. Hampir semua penguat magnetik memberikan kondisi persyaratan keluaran dc yang kurang

memuaskan, sekalipun ragam rangkaian telah diadopsikan di dalamnya. Rangkaian penguat *push – pull* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II. 21, termasuk salah satu cara yang paling banyak dilakukan dalam mengantisipasi kelemahan tersebut di atas. Apabila penguat dikenai sinyal kendali nol, maka keluaran dari MA<sub>1</sub> dan MA<sub>2</sub> akan sama besar tapi berlawanan polaritas, sehingga beda potensial pada beban akan nol juga.



**Gambar II. 21. Penguat Magnetik Dalam Sambungan *Push-Pull*.**

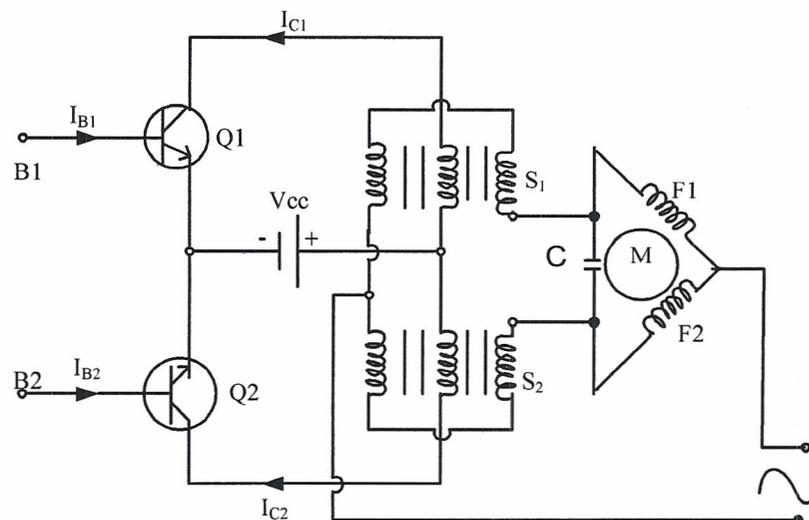
Sebaliknya, bila penguat dikenai sinyal kendali dibuat tidak nol dan menyebabkan naiknya tegangan keluaran MA<sub>1</sub>, sedangkan MA<sub>2</sub> makin turun, maka terminal beban bagian atas akan berpolaritas positif.

Demikian halnya jika sinyal kendalinya dibalik, akan menyebabkan polaritas tegangan beban yang berkebalikan juga. Rangkaian penguat magnetik ini dapat digunakan untuk mencatu sebuah generator penguat terpisah. Dalam hal ini penguat magnetik secara bergantian mencatu kumparan penguat medan pada setiap setengah periode.

#### **d. Pengendalian Putaran Motor Memakai Reaktor Jenuh.**

Reaktor jenuh yang kumparan arus searahnya dikendalikan oleh dua buah transistor yang bekerja bergantian dapat digunakan untuk mengendalikannya arah putaran motor ac berdaya kecil (Gambar II.22.). Motor ac ini dapat digunakan sebagai penggerak pena pencatat (*recorder*), penahan /penyangga jembatan penyetimbang, penggerak posisi kutup, atau pengatur piranti mekanik lainnya.

Piranti aktif elektronik transistor yang berfungsi sebagai pemberi informasi berupa besaran sinyal dan fase masukan yang akan menentukan kecepatan dan arah putaran motor yang dikendalikan. Pengendalian motor ini menggunakan dua buah reaktor jenuh (transduktor).  $S_1$  dan  $S_2$  yang merupakan komponen utama penguat magnetik; yang dalam hal ini memanfaatkan arus kolektor  $I_c$  sebagai pengubah fluksi inti dan / atau reaktansi induktif kedua transduktor tersebut.



**Gambar II. 22. Reaktor Jenuh ( MA ) Sebagai Pengendali Motor Ac Berdaya Rendah.**

Adapun sumber tegangan yang digunakan dalam sistem tersebut yaitu arus searah dan arus bolak-balik. Sumber arus searah mencatu daya ke transistor dan kumparan kaki tengah transduktor, sedangkan arus sumber bolak-balik digunakan untuk mencatu kumparan transduktor dua sisi lainnya dan motor kapasitor. Bila tegangan basis transistor  $Q_1$  lebih positif dari tegangan basis transistor  $Q_2$ , maka arus kolektor  $I_{C1}$  akan naik, sehingga reaktansi induktif pada reaktor  $S_1$  turun drastis dan jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan reaktansi induktif pada reaktor  $S_2$ . Akibatnya, kumparan medan  $F_1$  secara langsung tereksitasi arus ac, sedang kumparan medan  $F_2$  tereksitasi secara tidak langsung (sebagian) melalui kumparan reaktor  $S_2$  dan kapasitor  $C$ . Dengan demikian akan ada torsi awal jalan pada satu arah. Sebaliknya bila tegangan basis transistor  $Q_2$  yang lebih positif, maka arus kolektor  $I_{C2}$  yang mengalir pada kumparan kaki tengah  $S_2$  akan menyebabkan

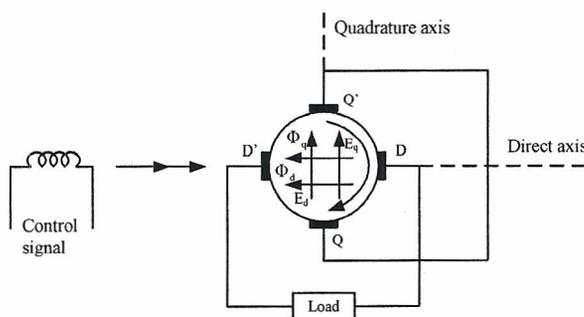
reaktansi induktif transduktor  $S_2$  turun jauh lebih kecil dibandingkan dengan reaktansi induktif reaktor  $S_1$ . Akibatnya kumparan medan  $F_2$  secara langsung tereksitasi arus ac, sedang kumparan medan  $F_1$  tereksitasi secara tidak langsung (sebagian) melalui kumparan reaktor  $S_1$  dan kapasitor C. Dengan demikian, motor akan berputar pada arah yang berlawanan.

#### 4. Penguat Putaran.

Setiap generator yang berputar dengan menghasilkan tegangan, pada dasarnya adalah sebuah penguat putaran, termasuk generator dc yang umumnya hamper tidak terpikirkan dalam konteks ini. Pada mesin-mesin dc penguat terpisah berdaya kecil, penguat dayanya (*power-gain*) dapat mencapai 50. Sementara pada system kendali *loop* tertutup, penguat putaran dapat menghasilkan faktor penguat daya hingga  $10^4$ . Penguat putaran tipe ini dapat dijumpai pada pengoperasian *Amplidyne* dan *Metadyne*, sebagaimana akan dijelaskan berikut ini.

#### 5. Amplidyne dan Metadyne.

Dua mesin listrik (*Amplidyne dan Metadyne*) yang memiliki konstruksi mekanik hampir sama ini, keduanya dapat dijelaskan sekaligus. Armatur mesin ini diatur oleh penggerak mula luar yang putarannya konstan. Arus yang mengalir pada kumparan kendali akan menghasilkan fluksi kendali  $\Phi_C$  pada satu sumbu mesin yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar II. 23.



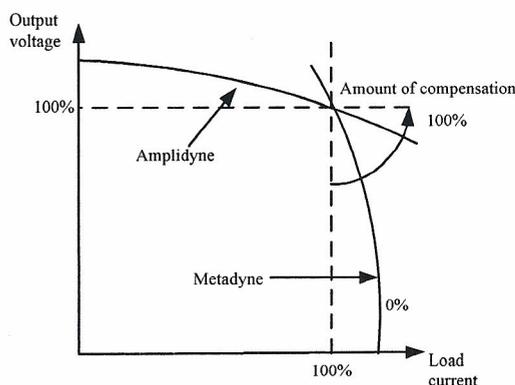
**Gambar II.23. Prinsip Operasi *Amplidyne dan Metadyne*.**

Sikat Q dan Q' yang terletak pada sumbu yang saling tegak lurus menyatakan sikat-sikat generator dengan ggl induksi sebesar  $E_2$ . Sikat-sikat ini dihubung singkat, sehingga dihasilkan arus yang sangat besar dan tertahan di dalamnya.

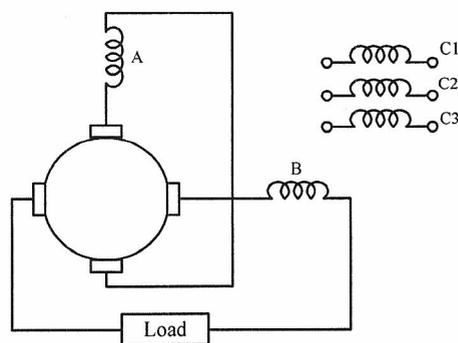
Akibatnya, timbul reaksi armatur berupa fluksi kisar  $\Phi_d$  di sekitar sumbu yang saling tegak lurus. Karena armatur berputar pada fluksi kisar, maka diantara sikat-sikat tambahan D dan D' yang terletak pada sumbu datar timbul gaya gerak listrik.

Beban luar dihubungkan pada sikat-sikat sumbu datar dan fluksi reaksi armatur  $\Phi_d$  yang dihasilkan pada sumbu datar tadi akan melawan fluksi kendalinya. Mesin inilah yang mendasari *Metadyne*. Pada mesin ini digunakan umpan-balik arus negatif seri, karena arus keluaran sebagai fungsi fluksi pada sumbu datar. Dengan adanya arus kendali tetap diharapkan arus generator akan konstan guna mengatasi adanya perubahan arus beban akibat perubahan fluksi  $\Phi_c$  dan  $\Phi_d$  pada sumbu datar dan arus keluaran didesak akan kembali ke harga semula.

Penambahan kumparan kompensasi pada *Amplidyne* bertujuan untuk mengurangi fluksi reaksi armatur  $\Phi_d$ . Dengan demikian, tegangan generator *Amplidyne* menjadi konstan, karena tegangan keluaran sebagai fungsi fluksi kendali. Karakteristik beban dari kedua mesin tersebut ditunjukkan pada Gambar II.24, dimana kedua mesin tersebut dapat beroperasi menggunakan kumparan kompensasi antara nol dan seratus persen.



**Gambar II. 24. Karakteristik  
Amplidayne**



**Gambar II. 25. Susunan Rangkaian  
Sebuah Amplidayne**

Berdasarkan pengalaman, komutasi sulit terjadi jika pada sumbu yang saling tegak lurus tidak diberi kutub-kutub magnet. Kesulitan tersebut dapat diminimisir dengan memasang kumparan tambahan pada sumbu yang saling tegak lurus (lihat Gambar II. 25) yang diharapkan menjalin timbulnya fluksi yang

memadai sekalipun besar arus yang mengalir pada sumbu yang saling tegak lurus ini rendah. Kumparan B adalah kumparan kompensator, sementara kumparan-kumparan  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  adalah sebagai kumparan kendalinya. Untuk mengurangi residu tegangan sekecil mungkin dapat dilakukan dengan cara memasang kumparan demagnetisasi (tidak ditunjukkan pada gambar). Kumparan tersebut dapat menerima catu daya luar dengan frekuensi antara 50 Hz hingga 400 Hz.

**Contoh soal :**

Sebuah mesin medan-silang yang menggunakan kompensasi 20 lilitan dan kumparan kendali 1500 lilitan mampu beroperasi hingga 66,7%. Perkirakanlah besar arus yang didapat apabila terminal keluarannya dihubung singkat dan arus pada kumparan kendali sebesar 50 mA.

**Penyelesaian :**

Ampere-lilit efektif pada sumbu datar adalah jumlah dari ampere-lilit kendali dengan selisih ampere-lilit kompensator dan armature. Katakanlah :

- $N$  = jumlah lilitan kumparan kendali medan
- $n$  = Jumlah lilitan efektif kumparan armature
- $n_c$  = jumlah lilitan kumparan kompensator
- $I$  = arus kendali medan dan
- $I_a$  = arus armature.

Besar ampere-lilit pada sumbu datar adalah :

$$NI + (n_c - n) I_a.$$

Tegangan keluaran adalah suatu konstanta yang dikendalikan dengan harga dari persamaan di atas. Karena terminal keluaran dihubung singkat, maka tegangan keluaran akan nol, sehingga arus hubung singkat adalah :

$$(n - n_c) I_a = NI, \text{ atau } I_a = NI / (n - n_c) = NI / \left( \frac{n}{n_c} - 1 \right) n_c$$

di mana rasio  $n_c / n$  adalah satuan per-unit kompensasi mesin.

Dalam hal ini  $I_a = 1500 \times 0,05 / (1,5 - 1) \times 20 = 7,5 \text{ A}$ .

### SOAL – SOAL LATIHAN

1. a. Dari gambar II.2.c, diketahui  $V_x = +3V$ ,  $V_y = +3V$  dan  $V_z = 4V$ , berapakah tegangan keluaran  $V_w$  ?
  - b. Jika  $V_w$  dari pertanyaan 1.a diumpamakan ke blok penguat  $G_1 = 0,25V/V$ , berapakah tegangan keluarannya ?
  - c. Jika keluaran pada pertanyaan 1.b. di atas diumpamakan lagi ke blok penguat  $G_2 = 50 V/V$ , berapakah tegangan keluarannya ?
2. Jika Gambar II. 4c, diketahui  $V_1 = +4 V$ ,  $V_2 = - 2V$ , dan  $R_{F1} = R_{F2} = R_1 = R_2 = R_3$ , berapakah tegangan keluaran  $V_o$  ?
3. a. Jelaskan secara singkat prinsip operasi dari sebuah thyristor!
  - b. Uraikan secara singkat mengenai konverter thyristor yang memiliki rentang sulut yang lebar dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan putaran sebuah motor induksi!
4. Sebuah thyristor akan digunakan untuk mengendalikan kecepatan putaran sebuah motor dc yang menyerap arus rata-rata 10 A dari sumber tegangan 220 Vac. Untuk membatasi armature dipasang sebuah tahanan seri dengan kumparan armaturnya sebesar 1 Ohm. *Berapa  $R_s$  yang diperlukan ?*
5. Sebuah reaktor jenuh akan digunakan mengendalikan arus dalam rangkaian resistif. Gambarkan bentuk gelombang arus beban tersebut bila:
  - a. Tanpa menggunakan kumparan kendali dan rangkaian dicatu dari sumber ac (sinusoidal) : (1) tegangan rendah dan (2) tegangan tinggi.
  - b. Menggunakan kumparan kendali dc.
  - c. Kemukakan garis besar keuntungan metode lain dari tipe pengendali arus terutama yang banyak diaplikasikan di industri.
6. a. Jelaskan bagaimanakah cara mendapatkan konstanta atau konstanta arus dari sebuah mesin medan putar
  - b. Uraikan cara kerja kelistrikan sesuai referensi mengenai diagram rangkaian yang menunjukkan generator beserta bebannya.
  - c. Apakah prinsip kerja mesin tersebut sama dengan operasi sebuah penguat daya ?

7. Dari soal No.6 di atas, lukislah karakteristik tegangan keluaran Vs arus beban dari sebuah generator medan putar
- a. untuk kompensasi kurang,
  - b. kompensasi lebih,
  - c. kompensasi 100 %.