

Attuatori

Gli **attuatori** sono dispositivi che ricevono segnali elettrici di natura analogica o digitale dal sistema di elaborazione e di controllo e convertono energia elettrica in energia meccanica, termica, idraulica, elettrica (potenza elettrica), ecc., a seconda della grandezza controllata.

Esempi di attuatori finali di un sistema di controllo sono: la valvola motorizzata che regola l'afflusso dell'aria calda in un ambiente, il solenoide che produce un movimento lineare, il riscaldatore di un sistema di controllo della temperatura, il motore elettrico per generare una coppia meccanica su un albero, ecc.

In questa Unità sono analizzati alcuni attuatori elettromagnetici, elettromeccanici e amplificatori di potenza; sono richiamati, inoltre, i concetti fondamentali e i principi di funzionamento del motore passo-passo del solenoide, del relè, di alcuni amplificatori di potenza integrati e dei tiristori.

4.1 Solenoide

Il solenoide è un attuttore elettromeccanico che trasforma energia elettrica in energia meccanica producendo, su un'asta magnetica, un movimento di traslazione lineare di tipo *tutto o niente*.

I solenoidi sono impiegati nelle serrature elettriche (apertura di un cancello a distanza), nelle elettrovalvole (controllo di flusso), nei relè (apertura e chiusura di contatti elettrici), nei motorini di avviamento dalle automobili (innesto di ruote dentate per la trasmissione di coppia), ecc.

Il solenoide di traslazione lineare è costituito da un'armatura ferromagnetica cava nella quale è posto un nucleo ferromagnetico libero di scorrere e da una bobina elettrica (**figura 4.1**). L'asta mobile è connessa a un dispositivo per il controllo di contatti elettrici.

Se la bobina è alimentata con una tensione (continua o alternata a seconda del tipo), l'intensità di corrente nell'avvolgimento produce un'induzione magnetica le cui linee di flusso (**figura 4.1**) si richiudono sul percorso armatura-nucleo mobile. Quest'ultimo subisce una traslazione fino a rendere minima la riluttanza magnetica.

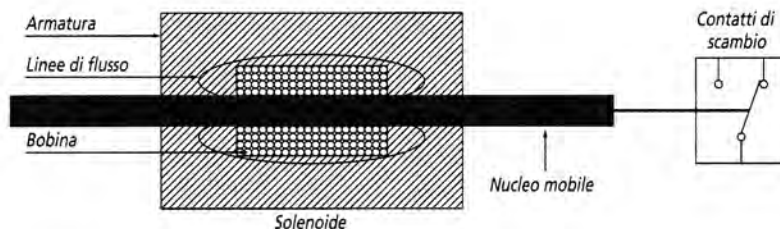


figura 4.1

4.2 Elettrovalvola



figura 4.2

Sostituendo la membrana con una bobina elettrica nella valvola pneumatica (Vol. 1 Mod. 2 Unità 5 figura 5.17) si realizza una elettrovalvola nella quale il comando del nucleo mobile è affidato a un segnale elettrico (figura 4.3). L'energia elettrica è trasformata in energia meccanica ossia in un movimento del nucleo mobile che può assumere la condizione di tutto aperto o di tutto chiuso (funzionamento ON/OFF).

La figura 4.3 mostra lo schema di apertura e chiusura della elettrovalvola normalmente chiusa per il controllo di un flusso fluido.

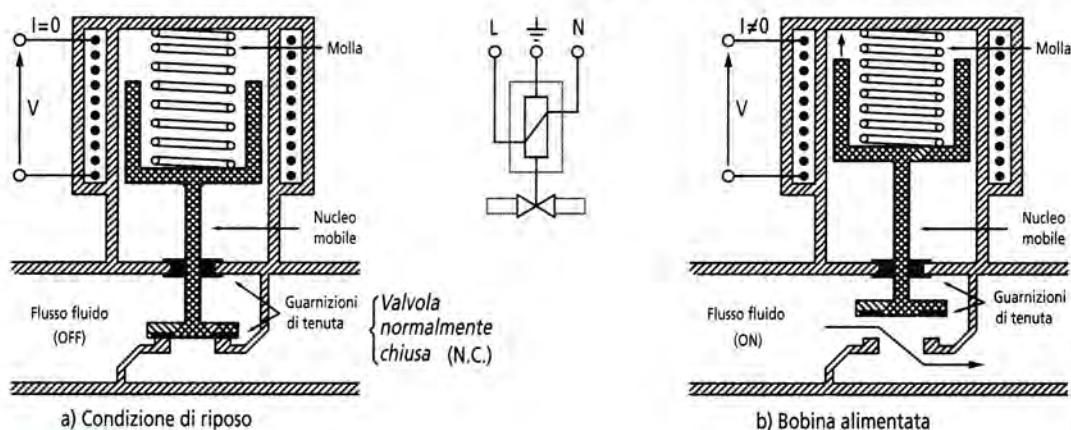


figura 4.3

In condizioni di riposo per una elettrovalvola normalmente aperta (figura 4.3 a) la forza della molla sposta in basso il nucleo chiudendo il flusso del fluido. Quando la bobina è alimentata, per la condizione di minor riluttanza, il nucleo è sottoposto a una forza che vince quella della molla. Il nucleo trasla in alto (figura 4.3 b) e apre completamente la valvola.

La figura 4.4 mostra lo schema di apertura e chiusura della elettrovalvola normalmente aperta.

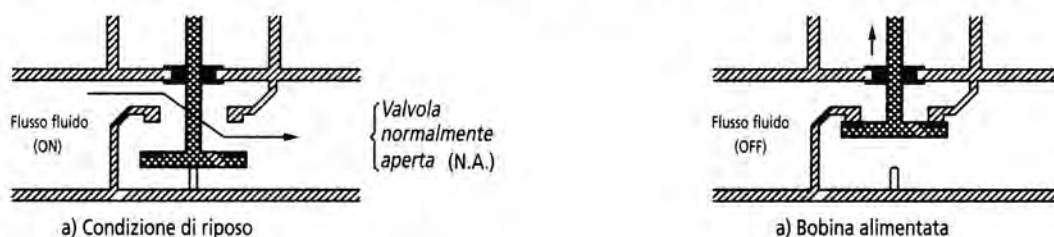


figura 4.4

La regolazione diviene di tipo proporzionale se l'apertura è proporzionale all'intensità di corrente che percorre la bobina.

Una tipica applicazione è il controllo, di tipo ON/OFF, del flusso di gas o di acqua in una abitazione civile. La figura 4.5 (vedi pagina seguente) mostra il controllo del flusso di acqua in caso di rottura della conduttura. Il trasduttore ceramico resistivo rileva la presenza di acqua diminuendo il valore resistivo da un valore infinito (circuito aperto) a un valore dell'ordine dei

M Ω , attiva il relè pilotato dal transistor che chiude il circuito dell'elettrovalvola normalmente aperta. L'amplificatore operazionale svolge la funzione di buffer analogico rendendo compatibile l'elevata resistenza del circuito di rilevamento con la bassa resistenza d'ingresso del transistor.

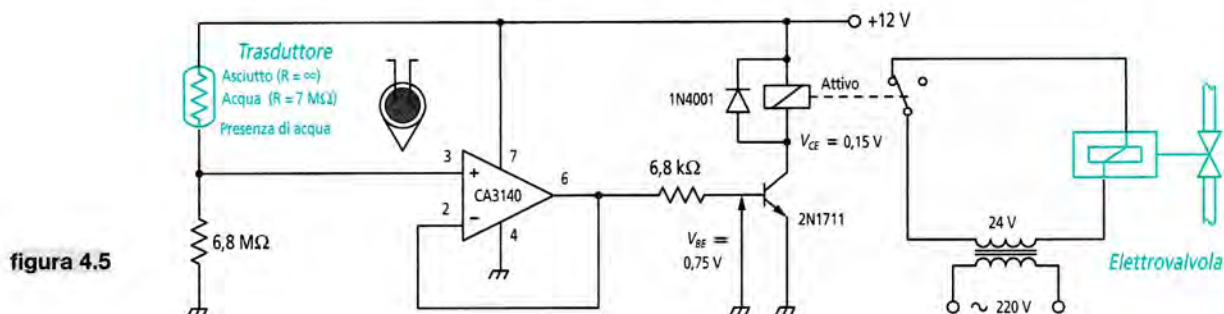


figura 4.5

4.3 Amplificatori di potenza lineari

Gli **amplificatori di potenza** (figura 4.6), utilizzati nei sistemi di controllo per fornire potenza agli attuatori (motori, solenoidi, ecc.), sono costituiti da più stadi (ingresso, intermedio, finale e di reazione) integrati in un unico chip (figura 4.7).

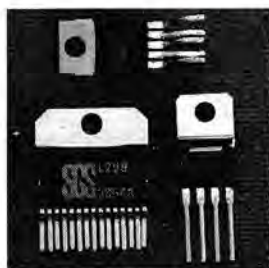


figura 4.6

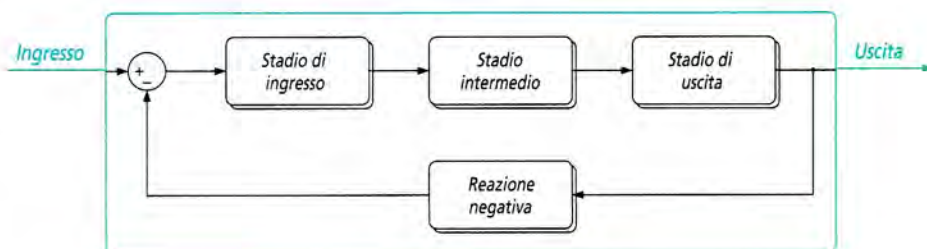


figura 4.7

Lo schema funzionale di un amplificatore di potenza con una struttura a *T* è composta da due transistor e quello ad *H* da quattro transistor (figura 4.8). Gli amplificatori con la struttura a *T* e quelli con la struttura ad *H* consentono d'invertire il verso di circolazione della corrente nel carico e, ad esempio, sono particolarmente utili nei sistemi di controllo della velocità dei motori in corrente continua per i quali è richiesto l'inversione del verso di rotazione dell'albero del motore.

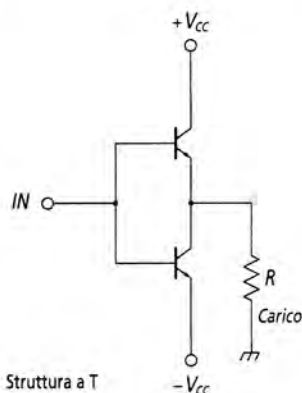
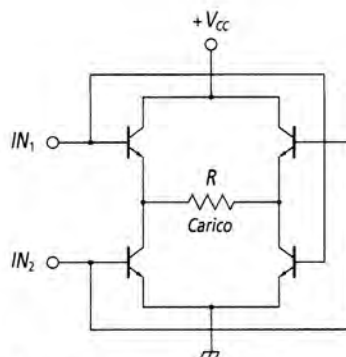


figura 4.8

Struttura a T



Struttura ad H

La struttura a T è semplice, consente di collegare il carico a massa e di prelevare un segnale di retroazione, ma introduce una distorsione di crossover e necessita di una sorgente d'alimentazione duale.

La struttura ad H è complessa e non permette il prelievo di un segnale di retroazione ma, a differenza della struttura a T , non introduce distorsioni e necessita di una sorgente d'alimentazione singola. In commercio vi sono sia amplificatori di potenza a transistor con lo stadio finale in configurazione darlington sia amplificatori di potenza operazionali.

Di seguito sono riportate le specifiche di alcuni amplificatori di potenza integrati.

- L149** SGS-Thomson: ha una struttura a T , un circuito di protezione termica, una protezione SOA (zona di lavoro utile per i transistor finali) e un circuito d'inibizione che disabilita l'integrato in caso di funzionamento errato (figura 4.9).



figura 4.9

- L298** SGS-Thomson: contiene due strutture a ponte identiche, richiede una sorgente d'alimentazione singola e un'altra per alimentare il circuito della logica di controllo (figura 4.10). Gli emettitori dei transistor sono collegati insieme e, pertanto, possono essere collegati a resistori esterni per generare tensioni di controllo. L'integrato ha un circuito di protezione termica, un circuito di controllo e una linea d'inibizione per ogni sezione. Il dispositivo è adatto per pilotare sia motori in corrente continua sia motori passo-passo.

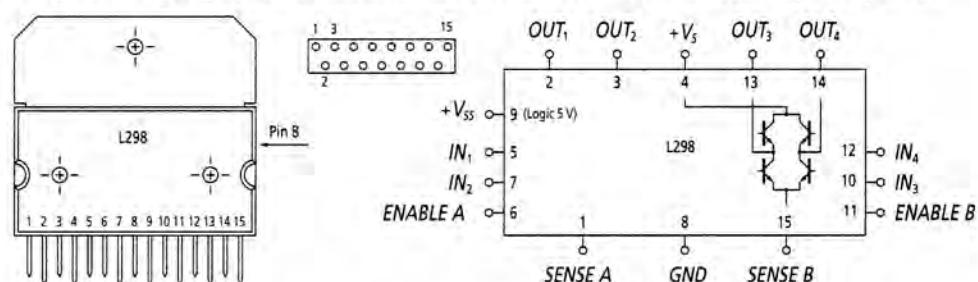


figura 4.10

- LM759** National: è costituito da uno stadio d'ingresso con configurazione differenziale, da uno stadio intermedio e da uno stadio finale di potenza con struttura a T . Contiene una protezione termica, una protezione contro la corrente di corto circuito e può lavorare con alimentazione singola o duale (figura 4.11).

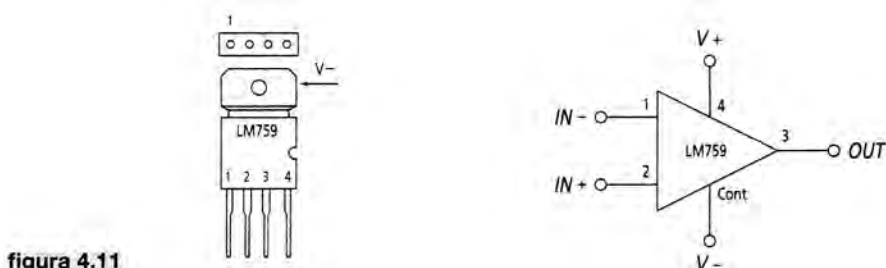


figura 4.11

- **L165** SGS-Thomson: è costituito da uno stadio d'ingresso con configurazione differenziale, da uno stadio intermedio e da uno stadio finale di potenza con struttura a T . Contiene una protezione termica, una protezione contro la corrente di corto circuito e può lavorare con alimentazione singola o duale (figura 4.12). I due transistor finali sono in configurazione darlington per aumentare l'intensità della corrente erogata. Due integrati L165 collegati in modo da formare una struttura a ponte consentono di pilotare motori in corrente continua e di invertire il verso di rotazione dell'albero del motore.

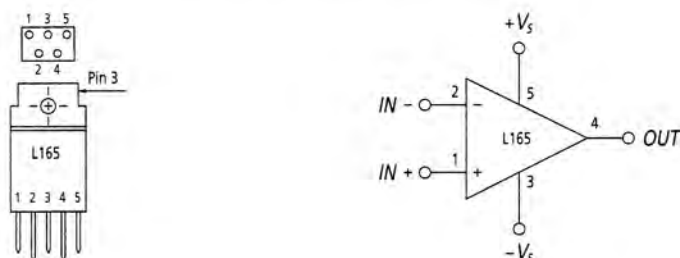


figura 4.12

- **LM12** National: è costituito da uno stadio d'ingresso con configurazione differenziale, da uno stadio intermedio e da uno stadio finale di potenza particolarmente adatto per pilotare motori in corrente continua e carichi induttivi. L'integrato (figura 4.13) ha un circuito di protezione termica, una protezione contro le sovratensioni ed è in grado di erogare correnti di intensità molto elevate (± 10 A) su carichi di basso valore (4Ω).

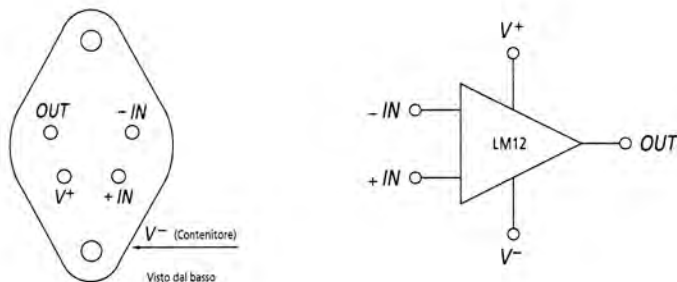


figura 4.13

tabella 4.1 Caratteristiche riassuntive amplificatori di potenza

	L149	L298	LM759	L165	LM12
Tensione d'alimentazione [V]	± 20	50	± 18	± 18	± 40
Potenza massima dissipata [W]	25	25 (75 °C)		20 (90 °C)	150 (75 °C)
Range di temperatura [°C]	$-40 \div 150$	$-40 \div 150$		$-40 \div 150$	$-40 \div 150$
Corrente di picco d'uscita (DC) [A]	4	3	325 mA	3,5	
Corrente massima d'uscita (DC) [A]	3	2,5		3	± 10
Protezione termica	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
Protezione SOA	Sì		Sì	Sì	Sì
Protezione in corto circuito			Sì	Sì	
Contenitore	Pentawatt	Multiwatt		Pentawatt	TO-3

4.4 Tiristori



I tiristori (figura 4.14) sono dispositivi di potenza molto utilizzati in ambito industriale perché consentono di trasferire potenze elevate al carico e presentano ingombro minimo e sono innescati con impulsi di corrente di brevissima durata. Il raddrizzatore controllato al silicio (SCR) può essere utilizzato con alimentazione sia in alternata sia in continua, mentre il TRIAC deve essere alimentato con tensioni in alternata.

figura 4.14 ■ SCR

È un dispositivo unidirezionale ed è costituito da quattro strati di materiale semiconduttore drogato che formano le giunzioni J_1 , J_2 e J_3 con tre terminali detti anodo, catodo e gate (figura 4.15).

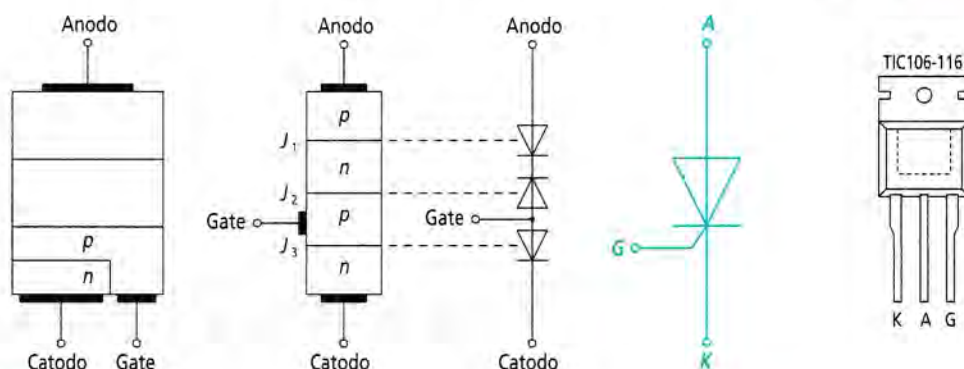


figura 4.15

Una tensione $V_{AK} > 0$ applicata tra anodo e catodo, con il gate aperto ($I_G = 0$) e con $V_{AK} < V_{BO}$, polarizza direttamente le giunzioni J_1 e J_3 e inversamente la giunzione J_2 . In tali condizioni il dispositivo è in interdizione (stato di OFF) e la corrente anodica ha una intensità trascurabile e uguale alla corrente inversa della giunzione J_2 polarizzata inversamente (figura 4.16). Il dispositivo rimane nello stato di OFF fino a quando la tensione anodo-catodo è minore della tensione di *breakover*. Il tiristore passa nello stato di ON e si comporta come un'unica giunzione $p-n$ polarizzata direttamente quando la tensione $V_{AK} = V_{BO}$. Nello stato di ON si ha un aumento della corrente anodica e una diminuzione della tensione anodo-catodo. L'intensità della corrente anodica è limitata dall'impedenza del circuito. Iniettando una corrente d'intensità opportuna nel gate, il dispositivo entra in conduzione per una tensione $V_{AK} < V_{BO}$. Dalle curve caratteristiche d'uscita e quelle d'ingresso si rileva che la tensione d'innescio diminuisce all'aumentare della corrente di gate (figura 4.16). Dopo l'innescio il gate non ha più alcuna influenza e il raddrizzatore controllato al silicio rimane in conduzione anche se viene rimosso il segnale applicato sul terminale di controllo. Per riportare un SCR nello stato di OFF è necessario ridurre l'intensità della corrente anodica I_A a valori minori della corrente di mantenimento I_{AH} .

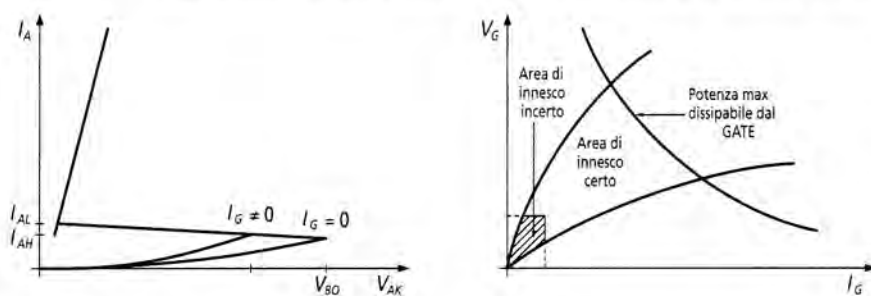


figura 4.16

lato al silicio rimane in conduzione anche se viene rimosso il segnale applicato sul terminale di controllo. Per riportare un SCR nello stato di OFF è necessario ridurre l'intensità della corrente anodica I_A a valori minori della corrente di mantenimento I_{AH} .

Nella **figura 4.17** è riportato lo schema elettrico di un circuito che trasferisce potenza su carico resistivo in modo ON-OFF. La corrente è fornita da un fototransistor che va in conduzione quando la sua base è colpita da una radiazione luminosa d'intensità opportuna. Nelle migliori condizioni di funzionamento un SCR trasferisce al carico la metà della potenza associata alla tensione alternata applicata tra anodo e catodo perché esso conduce solo durante la semionda positiva.

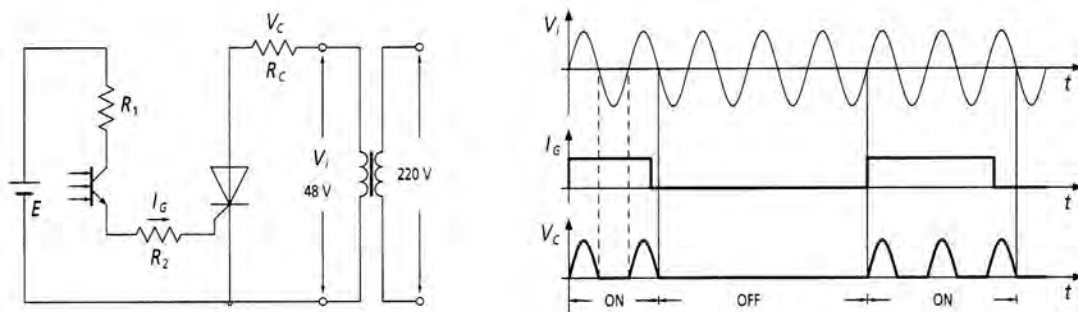


figura 4.17

Nella **tabella 4.2** sono riportate le specifiche principali del TIC116A (SCR).

tabella 4.2

	TIC116A (SCR)
V_{RRM}	100 V
I_A	5 A (media)
I_{AH}	40 mA
V_{GT}	2,5 V
I_{GT}	20 mA (max)
dv/dt	100 V/ μ s
Contenitore	TO 220

■ Utilizzando Multisim

Con riferimento alla **figura 4.17** si disegna con Multisim lo schema di **figura 4.18** sostituendo il fototransistor con un generatore di Clock che ha:

- frequenza $f_{Clock} = 10$ Hz;
- ampiezza della tensione $V_2 = 5$ V (TTL);
- Duty Cycle 50 %.

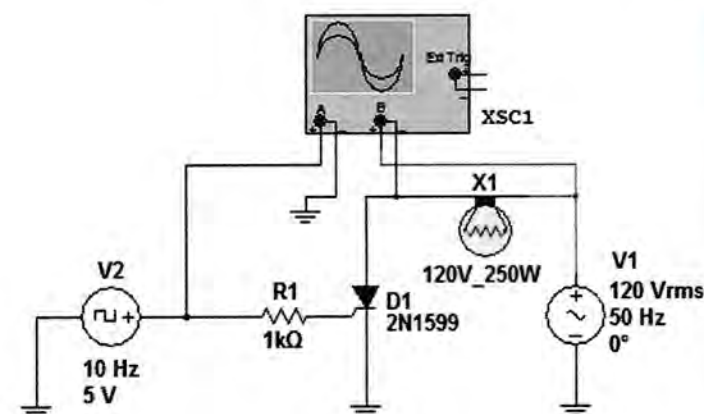


figura 4.18

Il generatore di tensione sinusoidale con ampiezza di 120 V in valore efficace (RMS) e frequenza $f_G = 50$ Hz alimenta la lampada (carico di 250 W). Come si può notare il rapporto di periodo è $100 \text{ ms} / 20 \text{ ms} = 5$ ossia un periodo della tensione di Clock contiene 5 periodi della tensione di alimentazione. Dopo aver attivato la simulazione, l'oscilloscopio doppia traccia, utilizzato in configurazione differenziale (in questo

caso molto utile), possibile solo con la simulazione di Multisim e non con strumenti commerciali per problemi di sicurezza, visualizza i due segnali in relazione tra loro (**figura 4.19**). La figura inoltre mostra che il segnale utile sulla lampada è costituito dalla sola semionda positiva della tensione alternata di alimentazione poiché il tiristore SCR si comporta come un circuito raddrizzatore.



figura 4.19

L'operatore può modificare il rapporto tra i due periodi o modificare il Duty Cycle e osservare i risultati. La **figura 4.20** mostra il risultato con il Duty Cycle al 75%.

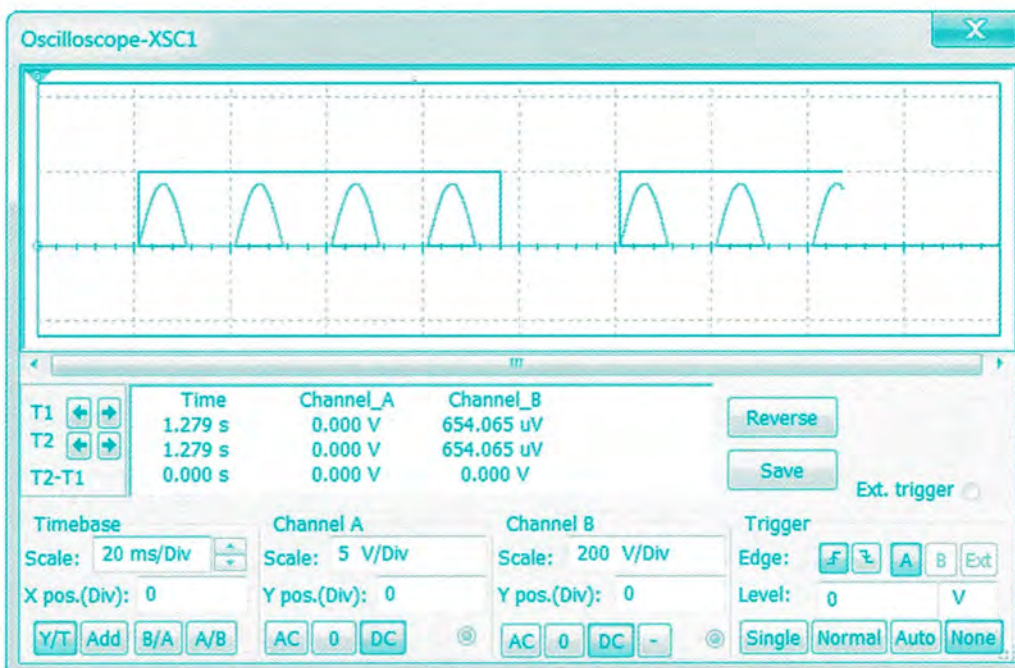


figura 4.20

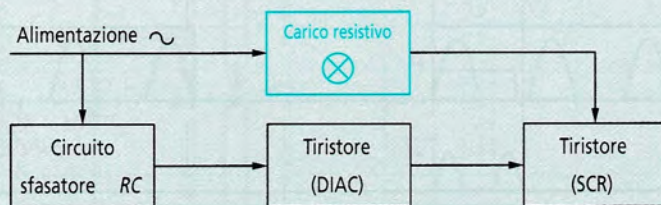
esercizi

svolti

1 Esempio

Si realizzi un circuito elettrico che regoli la potenza dissipata su un carico.

Nello schema a blocchi di **figura 4.21** è riportata una tipica applicazione della regolazione di potenza a parzialeizzazione di fase su una lampada a incandescenza per la variazione di luminosità.

figura 4.21

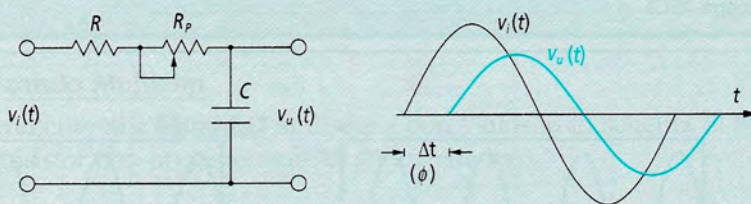
Lo schema a blocchi contiene:

- ▶ un circuito sfasatore di tipo RC;
- ▶ un DIAC che controlla l'innesco del tiristore SCR;
- ▶ un SCR che, per le sue caratteristiche di raddrizzatore a semionda, trasferisce alla lampada, al massimo, metà della potenza;
- ▶ un carico di tipo resistivo (lampada a incandescenza).

■ Circuito sfasatore

Il circuito sfasatore è costituito da una rete RC alimentata dalla tensione sinusoidale dove il potenziometro R_p modifica lo sfasamento φ in ritardo della tensione di uscita $v_u(t)$ rispetto a quella di ingresso $v_i(t)$ (**figura 4.22**). L'angolo di sfasamento φ si ricava dalla relazione:

$$\varphi = \text{artg } \omega \cdot (R + R_p) \cdot C = \text{artg } 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (R + R_p) \cdot C$$

**figura 4.22**

Con un oscilloscopio doppia traccia, non riportato nella figura, si può ricavare (utilizzando Multisim) la tabella che segue.

$R = 550 \, \Omega$, $R_p = 20 \, \text{k}\Omega$, $C = 1 \, \mu\text{F}$, $v_i(t) = 120 \, \text{V (RMS)} \Rightarrow 169 \, \text{V (Picco)}$					
R_p [%]	0%	25%	50%	75%	100%
$v_u(t)$ [V]	166	82	47	33	25
φ [°]	9	60	73	78	82

■ DIAC

L'ampiezza della tensione di uscita $v_u(t)$ del circuito sfasatore diminuisce all'aumentare del valore resistivo del potenziometro R_p come si evidenzia dalla tabella. Il DIAC, tiristore bidirezionale, s'innescia per tensioni di Breakover V_{B0} di circa 30 V con un conseguente abbassamento di tensione. Tale diminuzione di tensio-

ne con un conseguente impulso di corrente manda in conduzione il tiristore SCR. Poiché il DIAC s'innesca in ritardo rispetto alla tensione applicata (**figura 4.23**) aumenta lo sfasamento complessivo per la conduzione del tiristore SCR.



figura 4.23

Schema elettrico

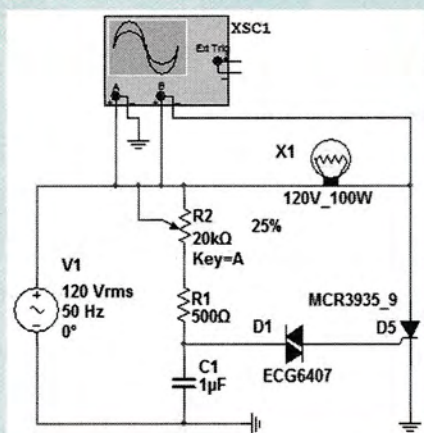


figura 4.24

Si disegna con Multisim lo schema elettrico di **figura 4.24** con l'oscilloscopio virtuale doppia traccia in configurazione differenziale. A differenza degli oscilloscopi commerciali, tale tipo di configurazione risulta molto utile perché dà la possibilità di visualizzare contemporaneamente sia il segnale non riferito a massa (tensione effettiva ai capi della lampada) sia quello riferito a massa (tensione di alimentazione).

Bisogna fare molta attenzione per questo tipo di collegamento. Infatti con gli oscilloscopi commerciali che non hanno tale caratteristica (ossia non permettono il collegamento differenziale) non è possibile visualizzare contemporaneamente i due segnali. In questo caso i due canali dello strumento hanno un unico riferimento per i due segnali ed è quello della massa collegata, tramite l'oscilloscopio, a terra.

La **figura 4.25** mostra la forma d'onda particolare trasferita alla lampada. L'operatore, modificando in percentuale il valore della resistenza del potenziometro R_p può osservare come si modifica la forma d'onda di uscita.

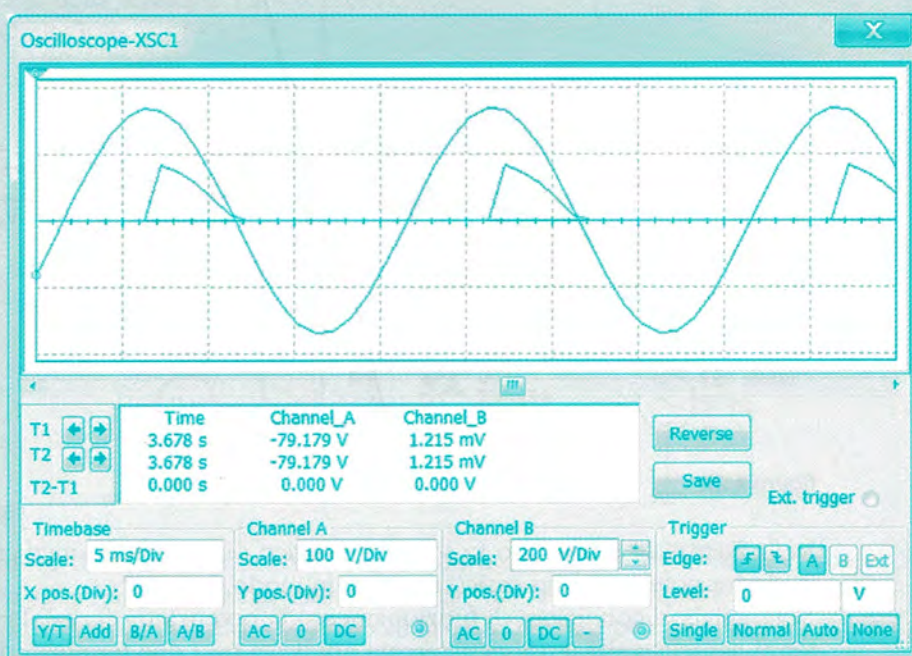


figura 4.25

TRIAC

È un dispositivo che consente la conduzione in entrambi i versi e la sua struttura può essere schematizzata con due SCR collegati in antiparallelo (**figura 4.26**). Il TRIAC può essere innescato in quattro modi:

$$1 - V_{MT2-MT1} > 0 \text{ e } I_G > 0$$

$$2 - V_{MT2-MT1} > 0 \text{ e } I_G < 0$$

$$3 - V_{MT2-MT1} < 0 \text{ e } I_G > 0$$

$$4 - V_{MT2-MT1} < 0 \text{ e } I_G < 0$$

La sensibilità del TRIAC al comando di gate è ottimale nel primo modo mentre per gli altri modi sono richiesti impulsi di comando d'ampiezza maggiore.

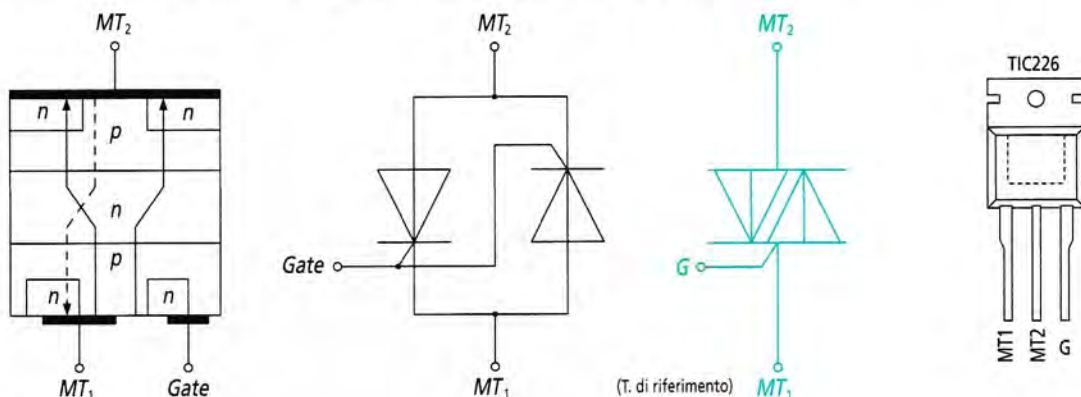


figura 4.26

Dalle curve caratteristiche d'uscita in funzione della corrente di gate dalle quali si osserva che la tensione $V_{MT2-MT1}$ d'innescò diminuisce all'aumentare dell'intensità della corrente di gate (**figura 4.27**).

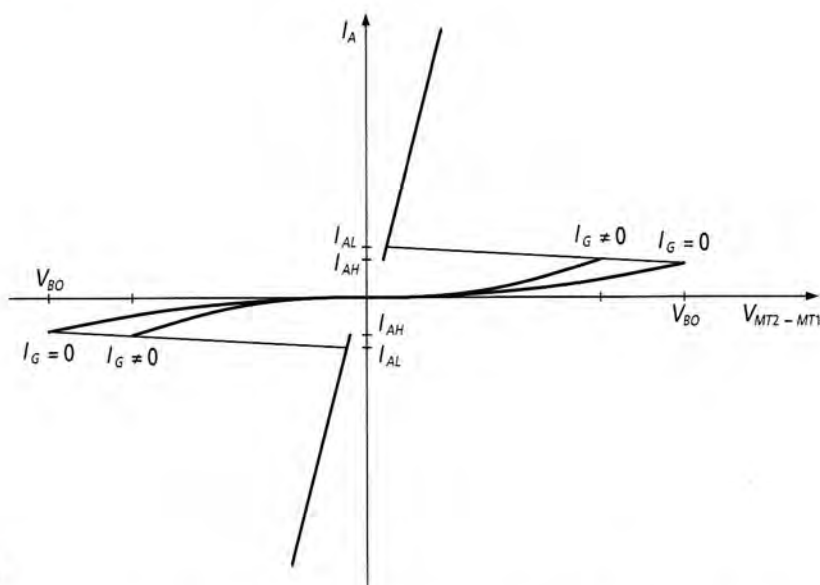


figura 4.27

Nella **figura 4.28** è riportato lo schema elettrico di un circuito mediante il quale è possibile trasferire potenza su un carico resistivo in modo ON-OFF.

Nelle migliori condizioni di funzionamento la potenza trasferita al carico è uguale alla potenza associata alla tensione alternata applicata tra i due terminali del TRIAC.

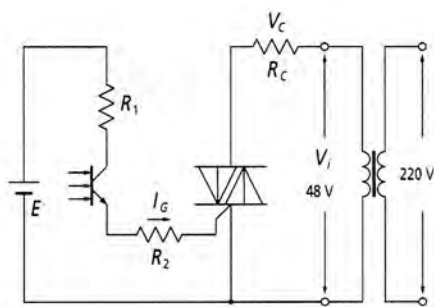
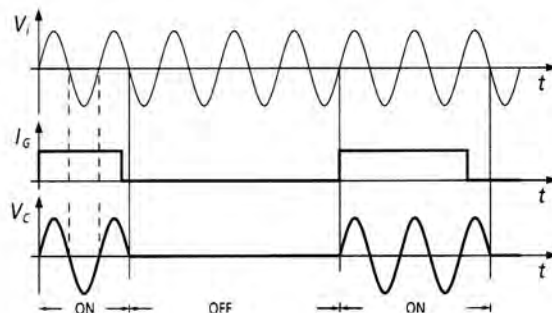


figura 4.28



Nella **tabella 4.3** sono riportate le specifiche principali del TIC226M (TRIAC).

tabella 4.3

	TIC226M (TRIAC)
V_{RRM}	600 V
I_A	8 A (RSM)
I_{AL}	± 70 mA
I_{AH}	± 60 mA
V_{GT}	2 V
I_{GT}	50 mA (1 e 3 quadr. max)
dv/dt	500 V/ μ s
Contenitore	TO 220

■ Utilizzando Multisim

Con riferimento alla **figura 4.28** si disegna con Multisim lo schema di **figura 4.29** sostituendo il fototransistor con un generatore di Clock che ha:

- frequenza $f_{Clock} = 10$ Hz;
- ampiezza della tensione $V_2 = 5$ V (TTL);
- Duty Cycle 50%.

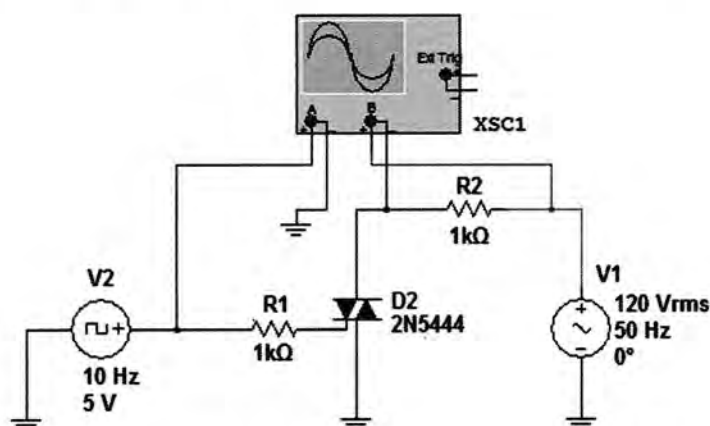


figura 4.29

Il generatore di tensione sinusoidale con ampiezza di 120 V in valore efficace (RMS) e frequenza $f_G = 50$ Hz alimenta una resistenza $R_2 = 1$ k Ω (carico resistivo). Come si può notare il rapporto di periodo è 100 ms / 20 ms = 5 ossia un periodo della tensione di Clock contiene 5 periodi della tensione di alimentazione.

Dopo aver attivato la simulazione, l'oscilloscopio doppia traccia, utilizzato in configurazione differenziale (in questo caso molto utile), possibile solo con la simulazione di Multisim e non con strumenti commerciali per problemi di sicurezza, visualizza i due segnali in relazione tra loro (**figura 4.30**). La figura inoltre mostra che il segnale utile sul carico è alternato come la tensione alternata di alimentazione.

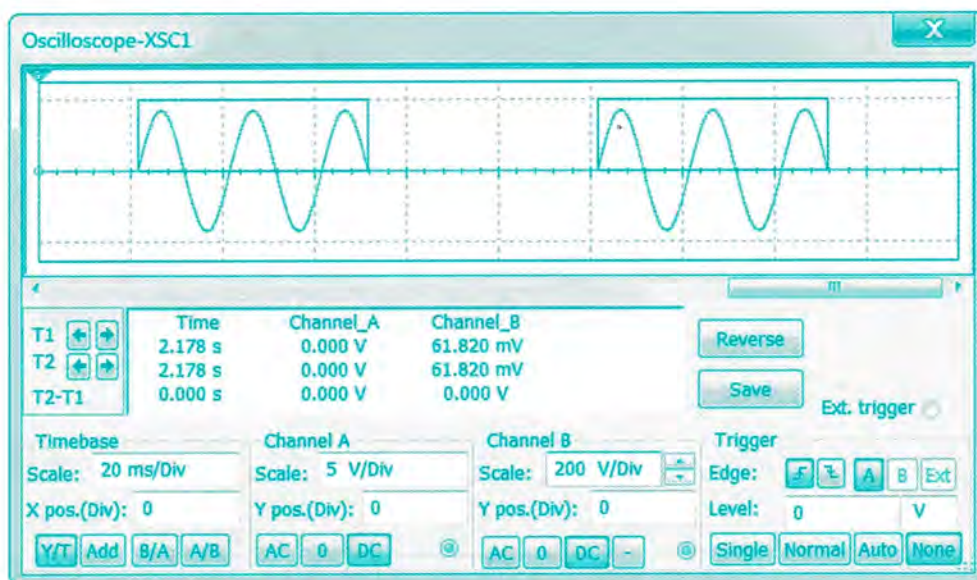


figura 4.30

L'operatore può modificare il rapporto tra i due periodi o modificare il Duty Cycle e osservare i risultati.

4.5 Relè stato solido



figura 4.31

Un Triac e un optoisolatore realizzano un relè allo stato solido (**figura 4.31**) che non presenta parti in movimento poiché i contatti mobili sono sostituiti dal tiristore in funzionamento ON-OFF. L'utilizzo del fotoaccoppiatore permette, inoltre, la separazione galvanica tra il circuito d'eccitazione e quello di potenza. Il relè allo stato solido proposto è costituito da un optoisolatore MOC3041 (**tabella 4.4**), da un Triac esterno, necessario per aumentare la potenza dissipabile sul carico, e da una rete di snubber o circuito smorzatore (R e C) che elimina gli inneschi indesiderati del Triac (**figura 4.32**). Alimentando il circuito d'ingresso del MOC si ha il trasferimento d'energia radiante dal diodo Ired al Fototriac interno e da questo al Triac esterno.

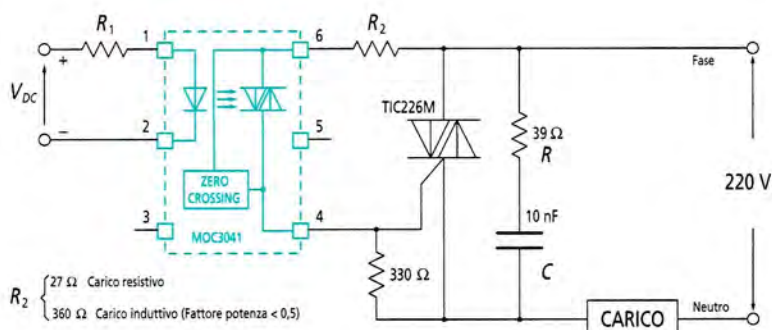


figura 4.32

tabella 4.4 Caratteristiche elettriche MOC3041.

MOC3041	
Tensione d'isolamento $V = 7\,500\text{ V}$	I_F Ired max 60 mA
Resistenza d'isolamento Ired-Optotriac $R = 10\text{ G}\Omega$	I_F Ired tipica 15 mA
Capacità tra Ired-Optotriac $C = 2\text{ pF}$ ($f = 1\text{ MHz}$)	Tensione Optotriac in ON 1,8 V
Innesco dell'Optotriac al passaggio dello zero Volt	Picco di corrente ripetitivo Optotriac 1 A
V_F Ired tipica 1,3 V e V_R Ired max 6 V	Tensione max Optotriac (Breakdown) in OFF 400 V

4.6 Motore passo-passo



figura 4.33

Il **motore passo-passo** (figura 4.33) trasforma energia elettrica in energia meccanica sotto forma di coppia motrice la quale, a sua volta, dà luogo a spostamenti angolari discreti del rotore, detti passi, in verso orario o antiorario. I motori passo-passo sono utilizzati nelle macchine per ufficio, nelle automobili, negli automatismi, nella robotica, ecc.

Si distinguono in motori passo-passo:

- ▶ a magneti permanenti;
- ▶ a riluttanza variabile;
- ▶ ibridi.

Il **motore passo-passo a magneti permanenti** è costituito da due o più coppie di espansioni statoriche e da un rotore a magnete permanente con polarità magnetiche proprie. Il dispositivo ha una coppia elevata, una velocità di rotazione bassa e può essere di tipo **bipolare** e **unipolare** (figura 4.34).

Gli avvolgimenti del motore passo-passo a magneti permanenti bipolari sono attraversati da una corrente in ambedue i versi. Nei motori a magneti permanenti unipolari gli avvolgimenti sono suddivisi in due parti uguali, in modo da rendere disponibile una presa centrale da collegare al positivo o al negativo dell'alimentazione e sono attraversati da una corrente avente sempre lo stesso verso.

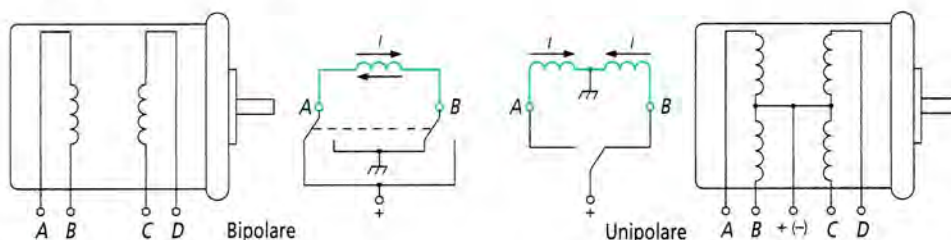


figura 4.34

Il **motore passo-passo a riluttanza variabile** è costituito da un nucleo di acciaio dolce non magnetizzato (rotore) e ha un numero di poli inferiore a quelli dello statore. Il principio di funzionamento si basa sul rendere minima la riluttanza del circuito magnetico di una coppia di poli statore-rotore. Il motore a riluttanza variabile genera una coppia minore di quella del motore a magneti permanenti, ma permette di avere una maggiore velocità di rotazione.

Il **motore passo-passo ibrido** ha una struttura "ibrida" perché utilizza le caratteristiche sia del motore a magneti permanenti e sia di quello a riluttanza variabile, ottimizzando le qualità di entrambi. Il rotore è suddiviso in due dischi e ha molti poli magnetizzati in modo diverso.

■ Motore passo-passo a magnete permanente bipolare

Il principio di funzionamento di un motore passo-passo bipolare è basato sull'interazione tra l'intensità dell'induzione magnetica generata dal magnete permanente e quella generata dagli avvolgimenti (figura 4.35).

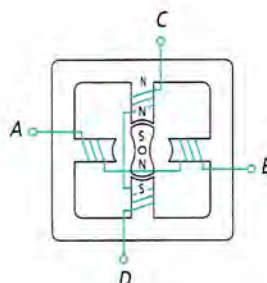


figura 4.35

L'alimentazione del motore passo-passo bipolare può essere costituita da un circuito logico e da transistor, oppure da integrati dedicati in grado di fornire i segnali di controllo alle fasi del motore nei tempi e nei modi stabiliti. Questa tecnica di azionamento consente di ottenere spostamenti angolari di estrema precisione che possono essere controllati da sistemi a microprocessori. Le sequenze di pilotaggio possono essere a *passo intero*, a *mezzo passo*, a un *quarto di passo* e a *micropassi*.

■ Passo intero

Nel *funzionamento a passo intero* si alimenta una fase alla volta (fase A attiva con T_1 è collegato ad A^+ e T_2 aperto) e si ha una rotazione del rotore di 90° in verso orario o antiorario (figura 4.36).

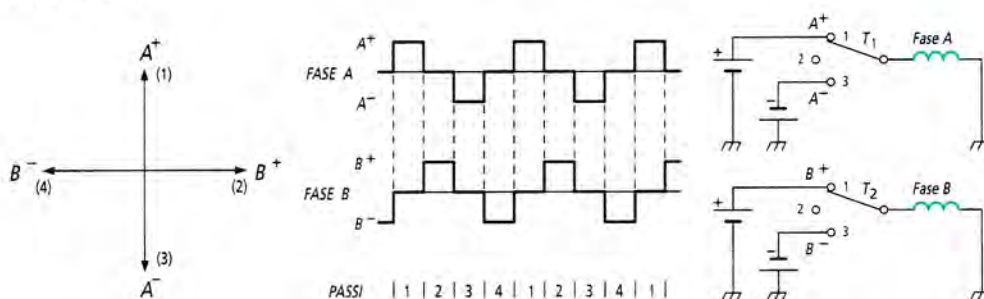


figura 4.36

Commutando T_1 e T_2 secondo la sequenza della **tabella 4.5** si ottiene il diagramma temporale di figura 4.36.

tabella 4.5

Passi	T_1	T_2	A^+	A^-	B^+	B^-
1	1	2	ON	OFF	OFF	OFF
2	2	1	OFF	OFF	ON	OFF
3	3	2	OFF	ON	OFF	OFF
4	2	3	OFF	OFF	OFF	ON

Mezzo passo

Nel *funzionamento a mezzo passo* le fasi A^-B^+ e C^+D^- sono alimentate alternativamente una alla volta e contemporaneamente (figura 4.37). In questo caso i due avvolgimenti sono attraversati da correnti aventi la stessa intensità generando due induzioni magnetiche statuariche, ortogonali tra loro e dovute rispettivamente alle correnti che attraversano le fasi AB e CD . L'induzione risultante è a 45° e l'intensità è maggiore di quella sviluppata nel funzionamento a passo intero. Per il principio d'allineamento dei vettori dell'induzione magnetica, il rotore subisce una rotazione di 45° (figura 4.37 e tabella 4.6).

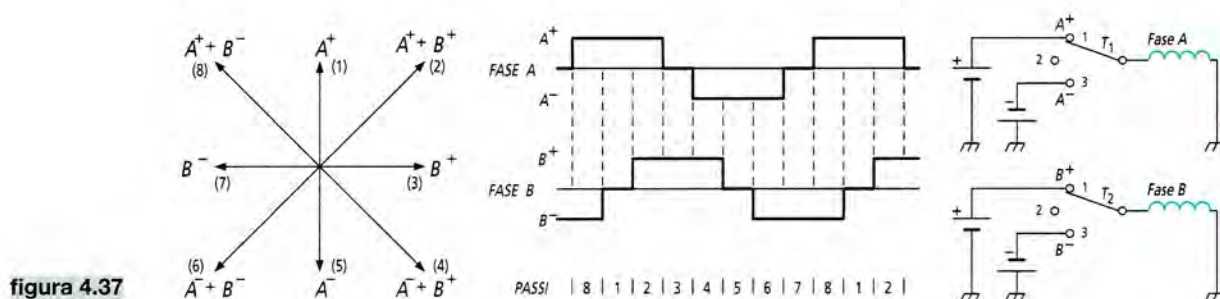


figura 4.37

tabella 4.6

Passi	T_1	T_2	A^+	A^-	B^+	B^-
1	1	2	ON	OFF	OFF	OFF
2	1	1	ON	OFF	ON	OFF
3	1	2	OFF	OFF	ON	OFF
4	3	1	OFF	ON	ON	OFF
5	3	2	OFF	ON	OFF	OFF
6	3	3	FF	ON	OFF	ON
7	2	3	OFF	OFF	OFF	ON
8	2	3	ON	OFF	OFF	ON

Quarto di passo

Il *funzionamento a un quarto di passo* si ottiene combinando alternativamente il funzionamento a passo intero e quello a mezzo passo. In questo caso per compiere una rotazione completa sono necessari 16 passi, in 8 dei quali una delle tensioni di alimentazione è dimezzata (passo 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14). In figura 4.38, nella pagina seguente, sono riportati i diagrammi.

Il funzionamento a un quarto di passo permette di ottenere un angolo di passo di $22,5^\circ$. In realtà esistono in commercio motori passo-passo a magnete permanente con passi di 18° , 15° , 9° e $7,5^\circ$. Per rendere ancora più piccolo l'angolo di passo si utilizzano tecniche di costruzioni particolari che diminuiscono il passo ($3,6^\circ$, $1,8^\circ$) fino a un minimo di $0,72^\circ$.

L'alimentazione del motore può essere fatta a impulsi singoli, oppure con una sequenza d'impulsi la cui frequenza determina la velocità di rotazione.

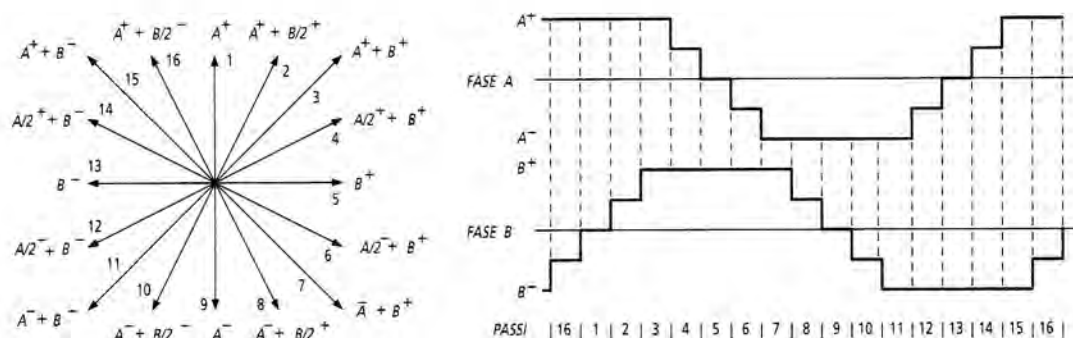


figura 4.38

■ Micropassi

Nel funzionamento a *micropassi* le tensioni di alimentazione delle fasi sono graduate in modo tale che la somma vettoriale dell'intensità delle correnti che attraversano gli avvolgimenti sia costante. In pratica si diminuisce in modo graduale l'intensità della corrente che attraversa una fase e contemporaneamente si aumenta, sempre in modo graduato, quella che attraversa l'altra fase (figura 4.39).

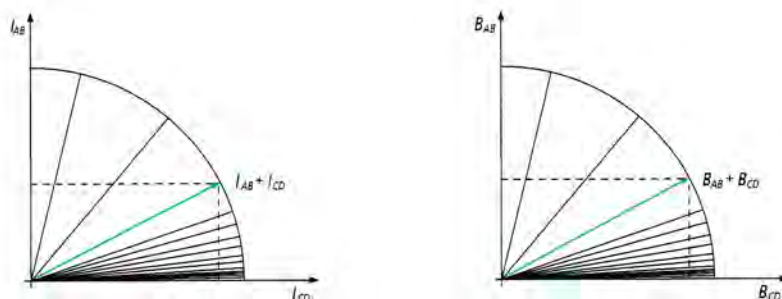


figura 4.39

Il modulo del vettore induzione magnetica risultante dalla somma dei vettori B_{AB} e B_{CD} è costante e la retta di azione del vettore campo magnetico risultante descrive un quarto di cerchio (figura 4.39). In tale modo la coppia disponibile è costante e il rotore subisce spostamenti angolari piccoli, detti *micropassi*.

Il numero dei micropassi dipende dalle caratteristiche elettriche e meccaniche del motore, dalla possibilità che esso risponda, senza errori, a tutti i livelli di tensione d'alimentazione. In commercio sono disponibili numerosi circuiti integrati dedicati al pilotaggio dei motori a micropassi. Tra questi si citano gli integrati PBM3960 e PBL3771 prodotti dalla Ericson e gli integrati L2117A e L6202 prodotti dalla SGS-Thomson.