
ATTUATORI

INTRODUZIONE

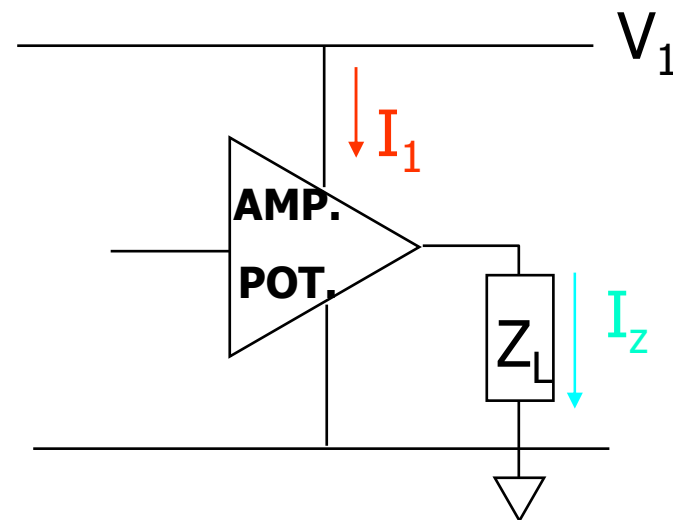
Attuatori = dispositivi che trasformano in potenza elettrica il segnale con cui interveniamo sul processo. Successivamente questa potenza viene trasformata in altre forme di potenza (meccanica, chimica, ...) a seconda delle esigenze del processo.

Una prima soluzione per fornire segnale elettrico al processo è costituita dall'utilizzo di un amplificatore di potenza.

L'amplificatore fornirà una potenza $W_1 = I_1 V_1$ in generale $>$ della W_z che va sul processo, essendo $I_1 > I_z$ e $V_1 > V_z$

La potenza che non arriva sul carico viene persa sull'amplificatore sotto forma di calore e questo può abbassare significativamente il rendimento dell'erogazione. Ok se le potenze in gioco sono piccole.

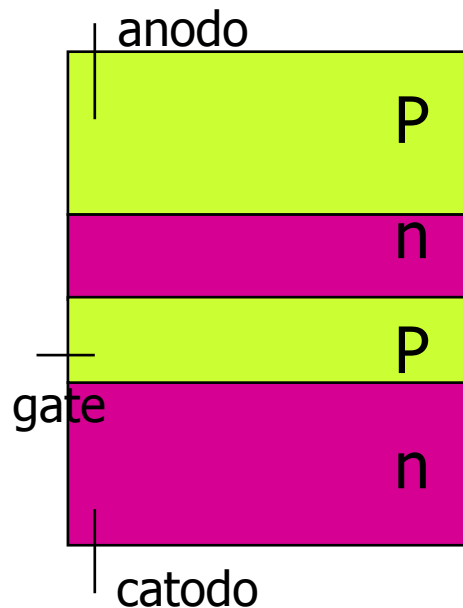
In caso di potenze maggiori si può mandare una forte potenza per intervalli limitati di tempo: il carico effettuerà una sorta di "media" come se una tensione + piccola fosse applicata costantemente (*soluzione chopper*). Oppure ...



SCR - SILICON CONTROLLED RECTIFIER

Un transistor commuta velocemente. Per potenze forti, tuttavia, il transistor disperde parecchio passando da interdizione a saturazione in tempi lunghi.

Gli SCR sono dispositivi a semiconduttore che rettificano la tensione in modo controllato continuando a commutare in modo veloce.

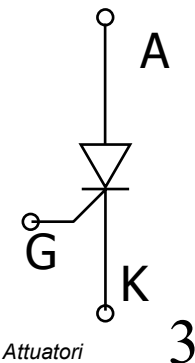
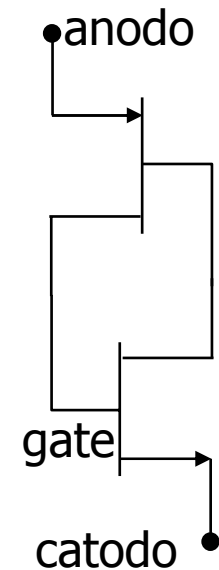


4 strati, 2 spessi e due sottili a drogaggio p/n. La situazione equivale ad avere due terne pnp e npn 'incastrate'.

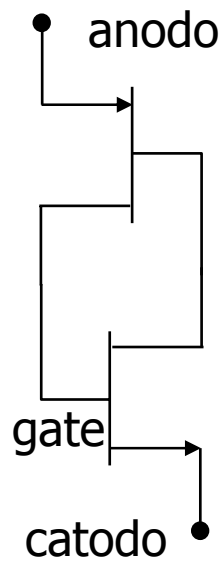
Gli strati sottili presentano uno spessore $<$ della lunghezza di diffusione dei portatori di carica: è ciò che si verifica comunemente in una base di un transistor.

La base dell'nnp è il collettore del pnp e viceversa.

Il dispositivo funziona in presenza di una differenza di potenziale >0 tra anodo e catodo e inviando un impulso positivo al gate in modo da far condurre la parte npn del circuito.



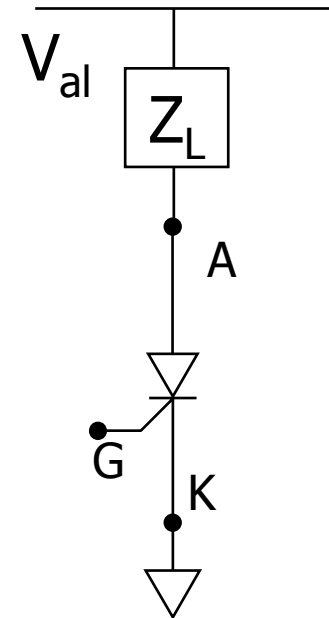
SCR - funzionamento



È necessario applicare un carico altrimenti la corrente inviata al gate viene amplificata dal npn, che la 'estrae' dalla base del pnp il quale a sua volta la amplifica ulteriormente e la reinvia di nuovo in base al npn.

Già al primo 'giro' il fattore di amplificazione è β^2 (100² es.), quindi in pochi passaggi la corrente rischia di rompere l'SCR.

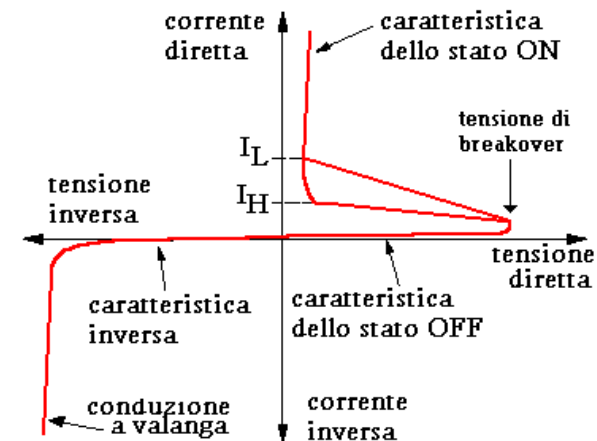
Un carico impedisce questo perchè limita la corrente.



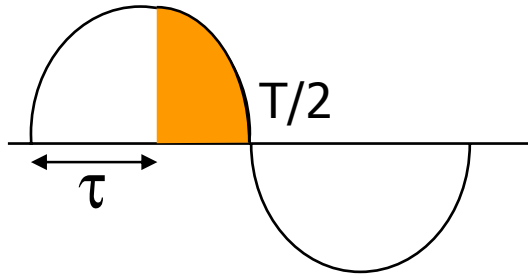
La caduta di tensione sull'SCR è di circa 1 V.

La V_{al} può essere applicata al carico in 2 modi:

- 1) parzializzazione della tensione di rete;
- 2) selezione periodi di rete



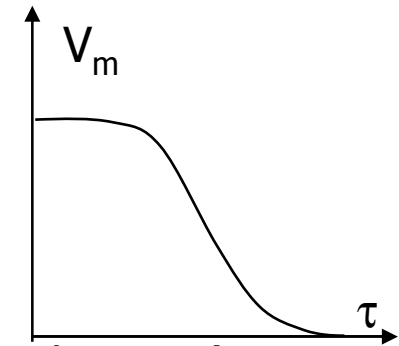
SCR - parz. periodo di rete con carico resistivo



Supponiamo di applicare una tensione alternata a un carico *resistivo*: per tensioni negative l'SCR è interdetto e se τ è il ritardo con cui viene inviato l'impulso di accensione, la potenza applicata sul carico è indicata in arancione.

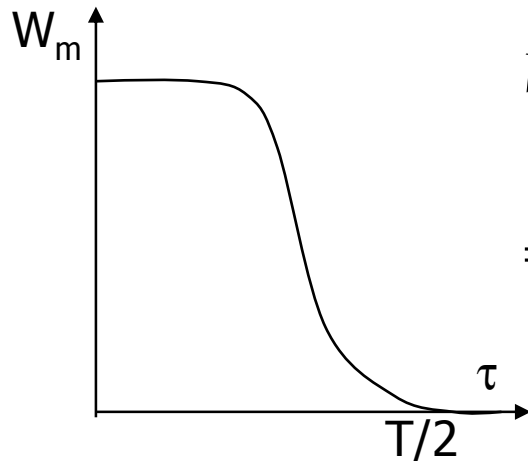
Vediamo la tensione media applicata:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{T/2} V_p \sin \omega t \, dt = \frac{V_p}{\omega T} \left[\cos \omega \tau - \cos \omega \frac{T}{2} \right] = \frac{V_p}{2\pi} [\cos \omega \tau + 1]$$

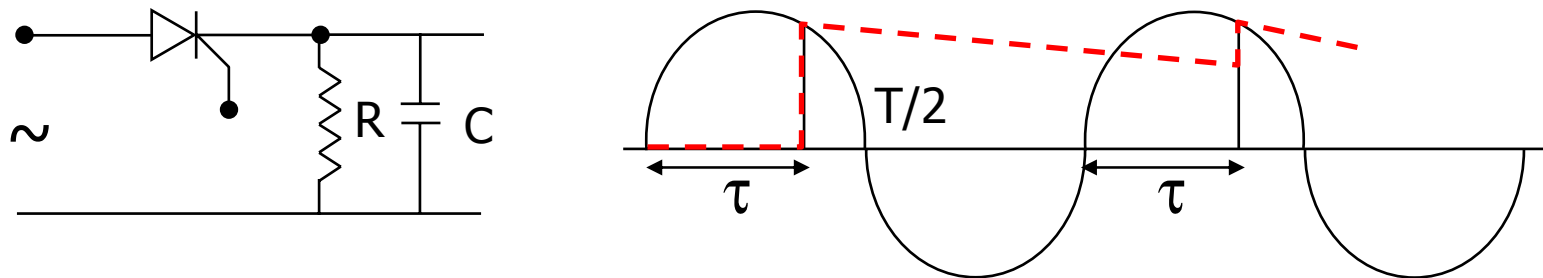


Vediamo la potenza media applicata (dipende dalla sensibilità del tipo di carico):

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{T} \int_{\tau}^{T/2} \frac{V^2(t)}{R} \, dt = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{T/2} \frac{V_p^2 \sin^2 \omega t}{R} \, dt = \frac{V_p^2}{R \omega T} \int_{\omega \tau}^{\omega T/2} \sin^2 x \, dx = \\ &= \frac{V_p^2}{4\pi R} [x - \sin x \cos x]_{\omega \tau}^{\omega T/2} = \frac{V_p^2}{4\pi R} [\pi - \omega \tau + \sin \omega \tau \cos \omega \tau] \end{aligned}$$



SCR - parz. periodo di rete con carico capacitivo

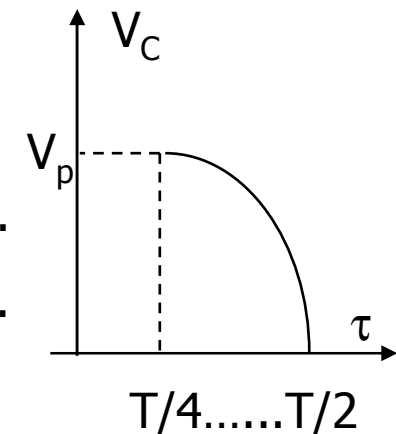


La tensione sul condensatore è nulla fino a che non si accende l'SCR. In quell'istante C si carica in maniera pressoché istantanea (dipende dalla corrente dell'SCR).

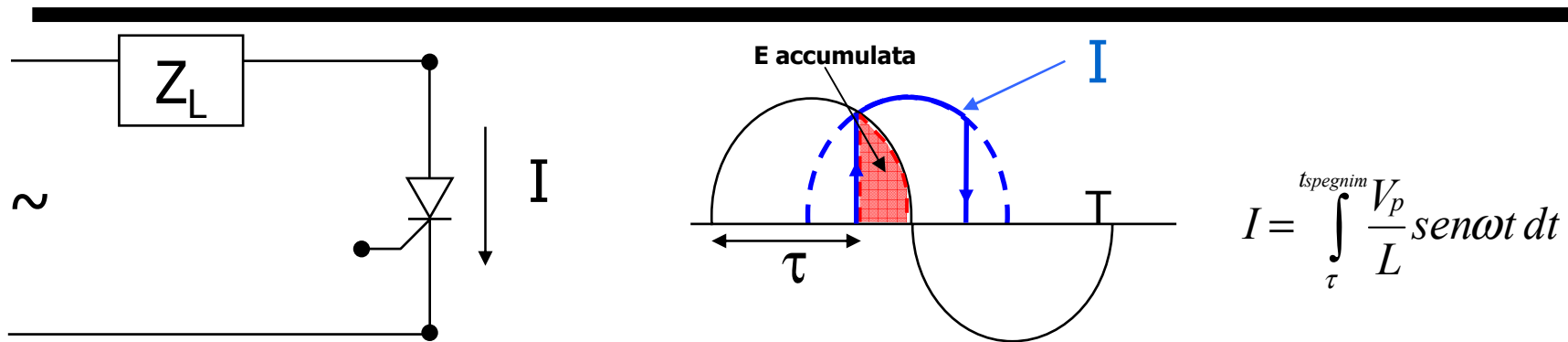
Se τ è nel secondo semiperiodo ($T/4 < \tau < T/2$) l'SCR si spegne subito perché ha il catodo a tensione pressoché fissa (scende con una costante pari a RC) mentre quella dell'anodo scende più velocemente.

Una volta spento l'SCR il condensatore si scarica tramite il circuito RC. In pratica $V_C = V_p \sin \omega\tau$ a meno della caduta esponenziale che si suppone piccola.

Se τ è nel primo semiperiodo ($0 < \tau < T/4$) l'SCR rimane sempre acceso e il condensatore si carica al valore di picco (carico non regolabile) dove rimane fermo perché poi l'SCR si spegne.



SCR - parz. periodo di rete con carico induttivo



All'istante τ viene dato l'impulso al gate dell'SCR che si accende.

La corrente è sfasata di 90° rispetto alla tensione di alimentazione e raggiunge il suo massimo quando la tensione si annulla.

Per tensioni negative l'SCR rimane polarizzato direttamente, solo fino a quando esiste una corrente che fluisce nella direzione anodo-catodo (la tensione invertita ha un effetto "drenante" la carica accumulatasi nella bobina).

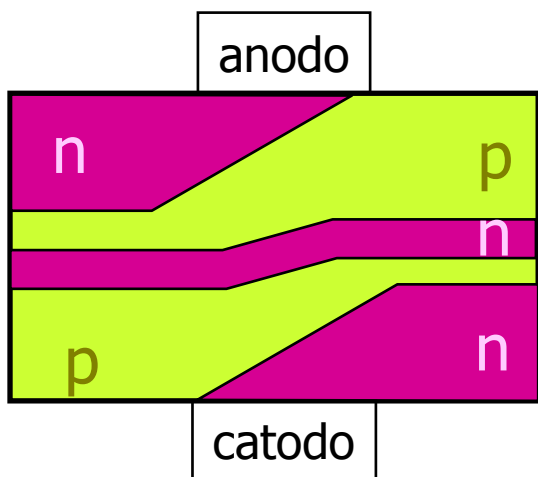
Questo accade (nella semionda negativa) per il tempo necessario a che la corrente si annulli. Se l'induttanza è ideale questo tempo è sempre pari a $T/2 - \tau$, perché l'induttanza (se ideale) deve restituire la stessa energia immagazzinata durante la conduzione nella semionda positiva.

A differenza di un carico resistivo quello induttivo mantiene in circolazione la corrente nell'SCR anche nella semionda <0 . Non si può, però, accenderlo nella semionda <0 .

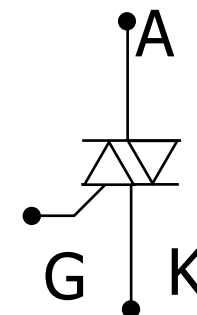
SCR- Osservazioni

- Rapide transizioni di correnti e tensioni all'atto dell'accensione \Rightarrow disturbi per altre apparecchiature o nella rete.
- Anziché parzializzare la tensione di rete, si può inviare o meno la semionda di segnale (es. 1 semionda su 3 \Rightarrow la potenza sarà sempre il 30% di quella disponibile). Soluzione lenta (bisogna aspettare il n° di periodi necessario).
- Il carico può avere capacità di media o integrazione del segnale applicato: se queste capacità si sviluppano su tempi brevi posso usare la prima tecnica proposta, in alternativa quest'ultima.
- Per un motore meglio parzializzare. Per un forno meglio 1 onda su 3.
- Vengono anche denominati tiristori
- Utilizzo tipico come raddrizzatore controllato di tensione e negli inverter.

TRIAC

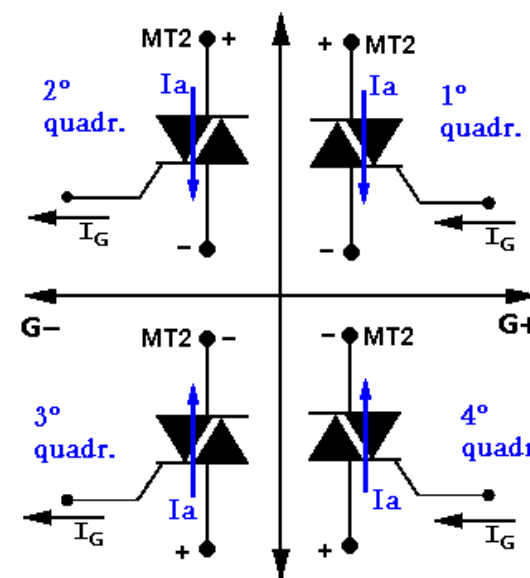
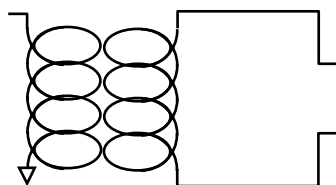
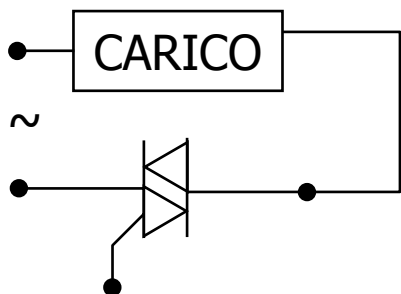


È simile a 2 SCR di tipo complementare affiancati (complementare \Rightarrow gate applicato allo strato n anziché p)



Un unico gate per accendere il dispositivo con tensioni +/-; solitamente si applica al gate un impulso + se $V_{ak} > 0$ e un impulso - se $V_{ak} < 0$. Si ha quindi conduzione in entrambe le direzioni. Il carico è applicato in serie e il TRIAC si spegne ogniqualvolta la tensione passa per lo zero.

Tipicamente, il TRIAC viene alimentato tramite un accoppiamento galvanico, che isola ed evita 'ground loop' pericolosi.

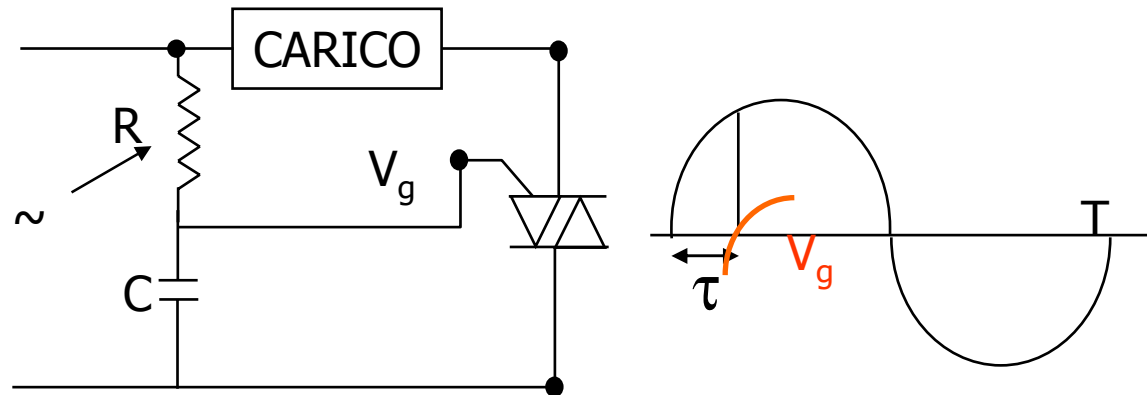


TRIAC/SCR - regolazione del ritardo

Utilizzo di una rete RC, per generare un impulso di gate con un ritardo opportuno.

Necessità di applicare al TRIAC 2 impulsi per ogni periodo di rete.

V_g segue la tensione di alimentazione con un ritardo t circa uguale a RC ($\ll T$).



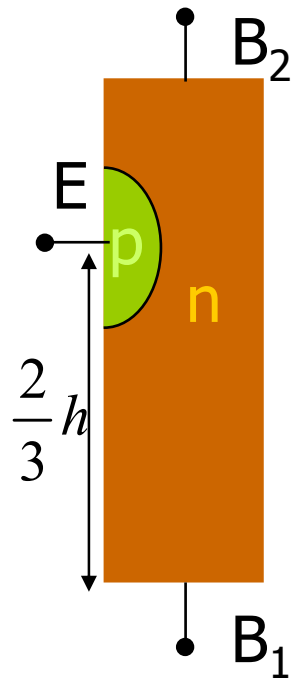
Per valori maggiori di RC è possibile raggiungere uno sfasamento di 90° dimezzando la potenza applicata.

È anche possibile 'programmare' il ritardo con un μP a patto che si sia in grado di stabilire l'istante di attraversamento per lo zero della tensione. La temporizzazione può avvenire tramite un timer che avvisa il processore di quando emettere un impulso per l'accensione.

Quando questo non è possibile si preferisce ricorrere a tecniche circuitali usando il transistor unigiunzione.

Utilizzo come relè, come variatore di alimentazione in piccoli elettrodomestici (lampadari) e motori elettrici. Miglior sfruttamento della potenza rispetto agli SCR ma anche necessità di dissipatori.

TRANSISTOR UNIGIUNZIONE



Barretta di silicio a debole drogaggio n \Rightarrow pochi portatori di carica liberi \Rightarrow la barretta equivale ad una grossa resistenza.

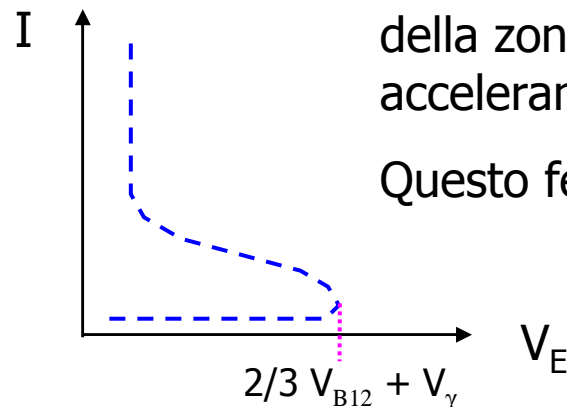
Strato a forte drogaggio p situato a circa $2/3$ della barretta.

Applicando una ddp tra le due basi, si ha una debole corrente e una distribuzione della tensione proporzionale all'altezza $\Rightarrow V_E = 2/3 V_{B12}$.

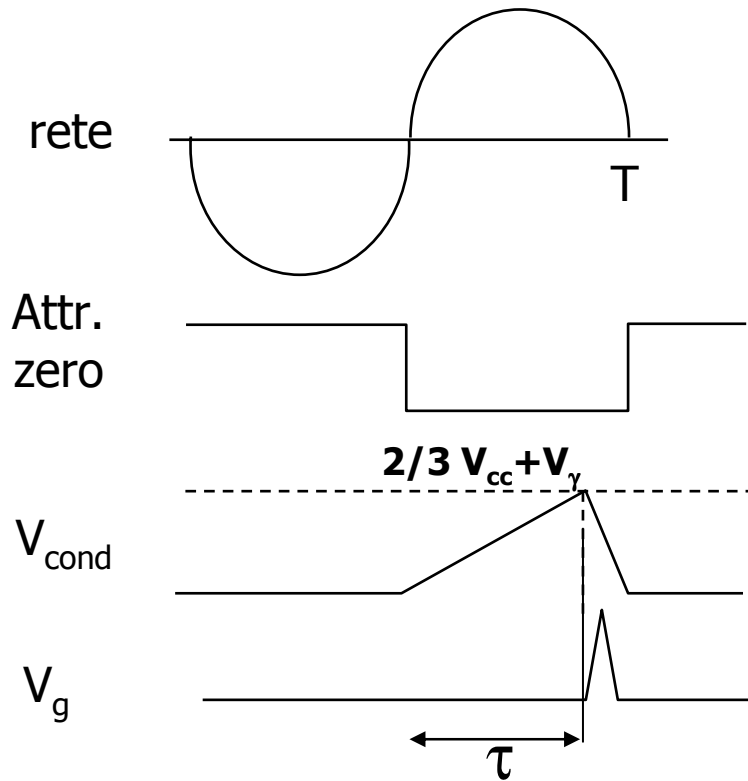
Applicando ad E una tensione $> 2/3 V_{B12}$ si avrà un'espulsione di 'lacune' dalla zona a forte drogaggio p verso il punto a potenziale più basso (B_1). La parte bassa della barretta si arricchisce di portatori di carica e la resistività diminuisce.

L'accumulo di carica tra la giunzione EB_1 diminuisce la resistività della zona diminuendo il dislivello in tensione tra E e B_1 ed accelerando il passaggio di cariche.

Questo fenomeno entro certi limiti fisici si auto-rigenera.



TRANS. UNIGIUNZIONE: controllo accensione SCR



$$\tau = \frac{2/3 C \cdot V_{cc}}{I_c}$$

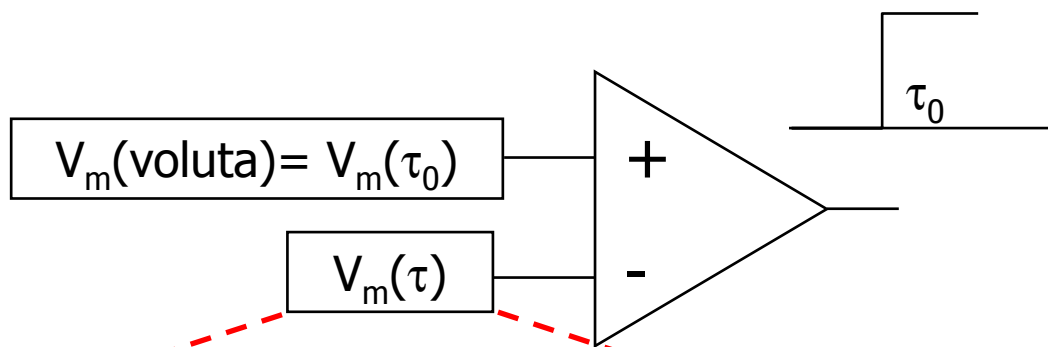
$$I_c = \frac{V_{cc} - V_b}{R}$$

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{RC \cdot V_{cc}}{V_{cc} - V_b}$$

V_b consente di regolare la velocità di carica del condensatore e quindi di stabilire quando accendere l'SCR (cioè la potenza erogata).

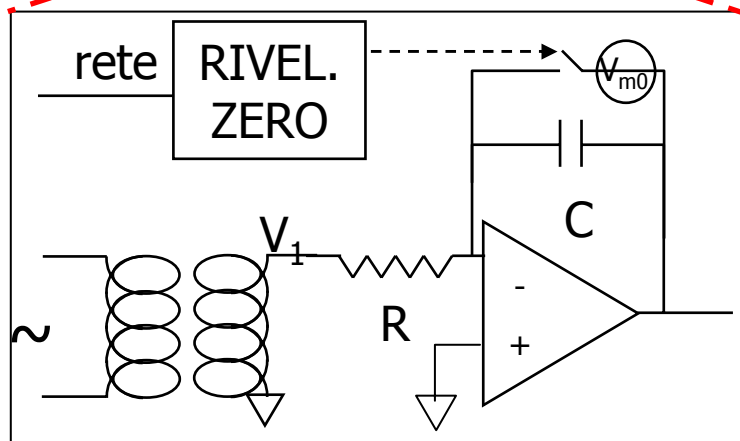
Forte non linearità tra ritardo e potenza applicata al carico

Controllo accensione SCR: migliorie



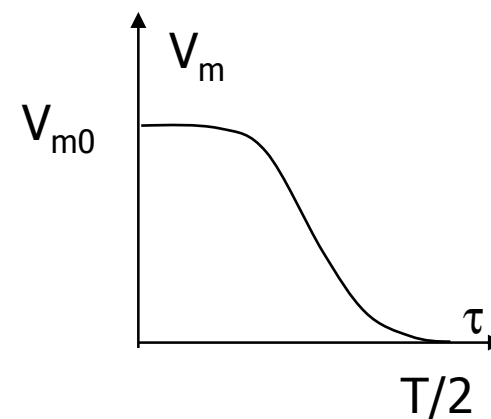
Imponiamo la tensione media V_m (pari alla potenza voluta), in modo che al τ corrispondente il comparatore emetta un impulso in grado di accendere l'SCR.

Come generare $V_m(\tau)$?



$$V_m = V_{m0} - \int_0^{\tau} \frac{V_1}{RC} dt$$

$$V_{m0} = \int_0^{T/2} \frac{V_1}{RC} dt$$



A questo punto agendo su $V_m(\tau_0)$ regolo la tensione sul carico (se 0 potenza nulla, se V_{m0} max. potenza)

In alternativa si può realizzare tramite μP una tabella con il ritardo di accensione in corrispondenza ad una tensione media voluta sul carico.

MOTORE IN CORRENTE CONTINUA

Ricalca, al contrario, il principio della dinamo tachimetrica, sfruttando il fatto che conduttori rotanti in un campo magnetico sviluppano una forza elettromotrice proporzionale alla velocità di rotazione. Si può dunque supporre che:

$$V=k\omega$$

Questa forza elettromotrice provoca il passaggio di una corrente che viene trasformata in una coppia meccanica secondo la relazione

$$\Gamma=k'I$$

La potenza elettrica assorbita dal motore è dunque

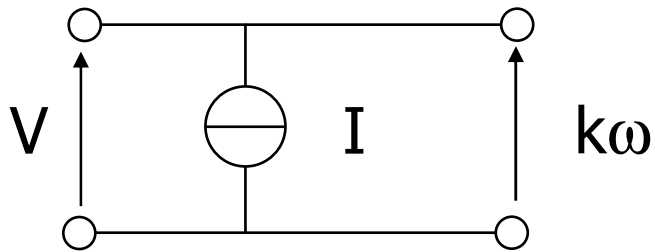
$$W_{\text{ele}}=VI=k/k' W_{\text{mecc}}$$

con $W_{\text{mecc}}=\omega\Gamma$ (pulsazione di rotazione coppia meccanica)

Se $k=k'$ non ci sono perdite e tutta la potenza elettrica viene convertita in potenza meccanica. Altrimenti possono verificarsi *perdite elettriche* (dissipazione potenza sulle resistenze e sui fili), *perdite meccaniche* (legate all'attrito), *sfasamenti elettrici* (effetti induttivi degli avvolgimenti presenti) e *meccanici* (dovuti all'inerzia del motore).

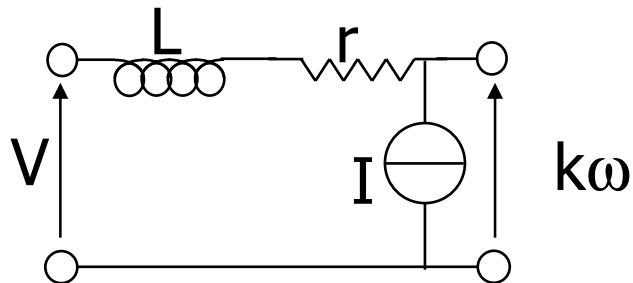
MOTORE IN CORR. CONTINUA: modello elettrico

CASO IDEALE



$$I = \frac{\Gamma}{k}$$

CASO REALE



In questo caso $k\omega$ non coincide con la tensione applicata per la presenza di componenti parassite di tipo elettrico (induttive e resistive).

Esiste una relazione tra la coppia generata e la velocità angolare di rotazione in cui si deve tener conto dell'attrito e dell'inerzia (modello meccanico); si ha:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \gamma\omega + J\dot{\omega}$$

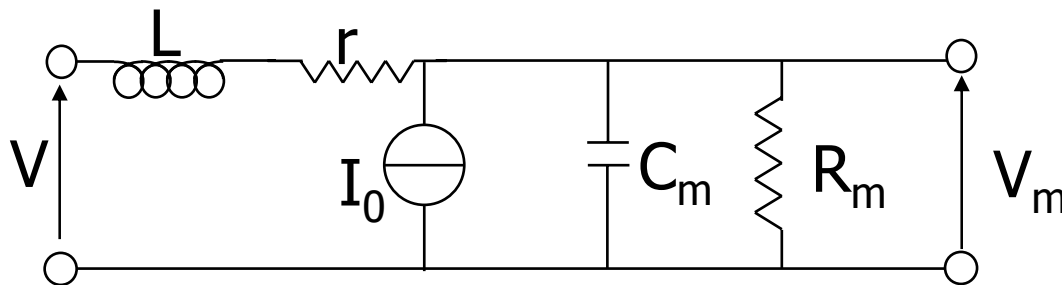
Γ_0 coppia utile, γ coeff. attrito, J momento d'inerzia

MOTORE IN CORR. CONTINUA: modello elettrico

Quindi
$$I = \frac{\Gamma_0 + \gamma\omega + J\dot{\omega}}{k'} = \frac{1}{k'} \left[\Gamma_0 + \frac{\gamma}{k} V_m + \frac{J}{k} \dot{V}_m \right]$$

Ponendo
$$I_0 = \frac{\Gamma_0}{k'} \quad R_m = \frac{kk'}{\gamma} \quad C_m = \frac{J}{kk'}$$

Abbiamo (L-trasformando)
$$I = I_0 + \frac{V_m}{R_m} + sC_m V_m$$



Modello reale usato per l'analisi del funzionamento del motore (V tensione applicata, $V_m = k\omega$ parte che arriva al motore)

MOTORE IN CORRENTE CONTINUA: osservazioni

Parametri elettrici che dipendono da fattori meccanici:

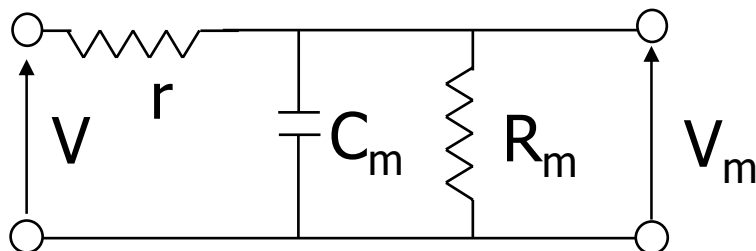
- R_m tanto > quanto < è il coefficiente di viscosità
- C_m tanto > quanto > è l'inerzia
- I_0 coppia utile (es. necessaria per vincere un attrito o sollevare un peso)

Caratterizzazione attraverso la relazione V_m /ingresso dove l'ingresso può essere una corrente o una tensione.

1) INGRESSO IN TENSIONE

il motore è caratterizzato da 2 costanti $\tau_m = R_m C_m$ e $\tau_{el} = L/r$ con $\tau_m \gg \tau_{el}$.

Si possono trascurare L e il generatore I_0 che non influenza la risposta in frequenza.



A regime $V_m \approx V$ essendo $R_m \gg r$

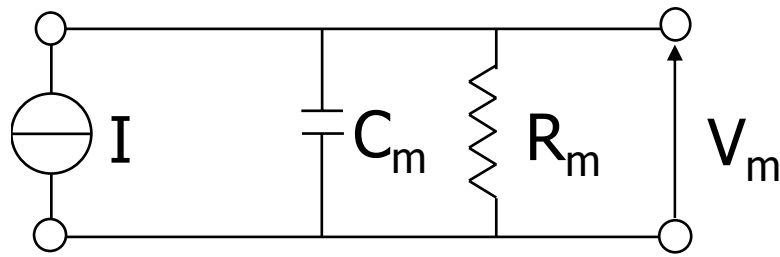
$$\frac{V_m}{V} = \frac{\frac{1}{r}}{\frac{1}{r} + \frac{1}{R_m} + sC_m} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R_m}} \frac{1}{1 + s\tau_v}$$

$$\text{con } \tau_v = \frac{rR_m}{r + R_m} C_m$$

MOTORE IN CORRENTE CONTINUA: osservazioni

2) INGRESSO IN CORRENTE

Si può trascurare r (oltre a L e I_0) che è in serie con la resistenza ∞ del generatore.



$$\frac{V_m}{I} = \frac{R_m}{1 + s\tau_m} \quad \text{con } \tau_m = R_m C_m$$

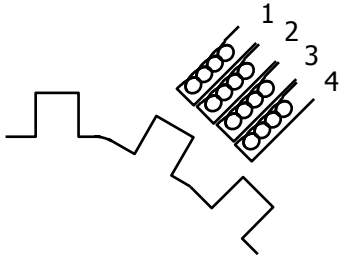
A regime la velocità di rotazione dipende solo dai termini di attrito.

τ_m è tanto $>$ quanto $>$ è l'inerzia e minore l'attrito. Un motore 'frenato' raggiunge prima la propria velocità di regime.

Come si può frenare il motore?

- 1) annullando la tensione: la capacità C_m si scaricherà su $r \parallel R_m$
- 2) annullando la corrente: la capacità C_m si scarica solo su R_m (+ lento)

MOTORE PASSO-PASSO



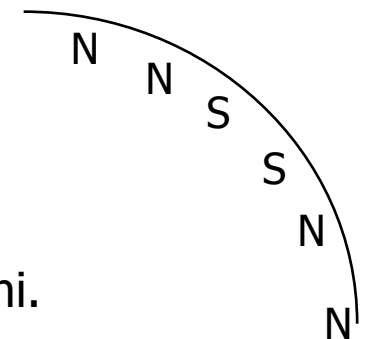
Attuatore che risponde all'ingresso dato con una variazione di posizione. È una macchina diversa dal motore in corrente continua perché le grandezze elettriche vengono definite in termini di "posizioni" piuttosto che di forze. È basato su un rotore sagomato con espansioni ferromagnetiche ed uno statore con 4 avvolgimenti.

Ogni 'dente' verrà attratto dal campo sviluppato dagli avvolgimenti, alimentati in maniera alternata a coppie (1-2, 2-3, 3-4).

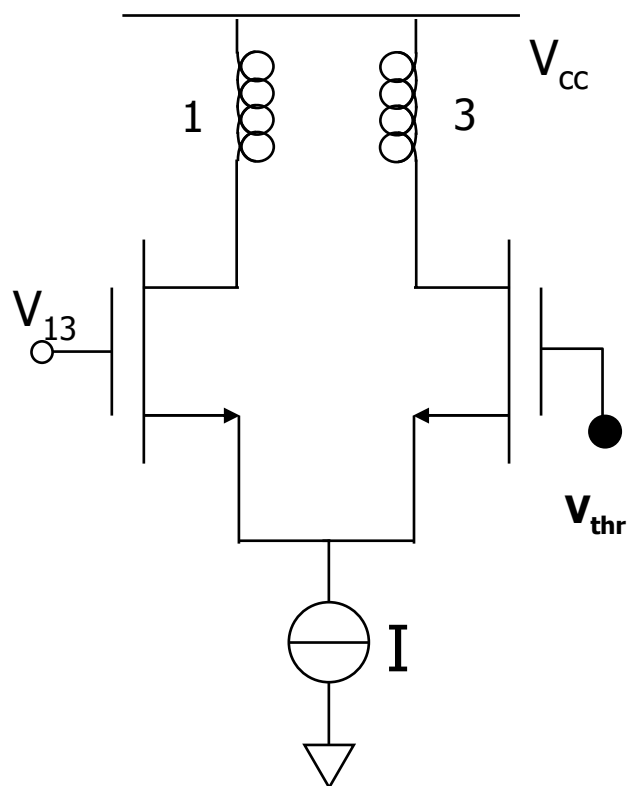
1	2	3	4
ON	ON	OFF	OFF
OFF	ON	ON	OFF
OFF	OFF	ON	ON
ON	OFF	OFF	ON
ON	ON	OFF	OFF

Essendo gli avvolgimenti distanti di $1/4$ del passo angolare di un dente, esso percorrerà in 4 step tutto il tratto al di sotto di essi.

Il rotore, può essere, in realtà realizzato con polarità positive/negative (del tipo SUD/NORD) in grado di provocare attrazioni e repulsioni.



MOTORE PASSO-PASSO: circuito di comando



Tra gli avvolgimenti 1-3 e 2-4 conduce sempre e solo uno dei due, possiamo usare uno 'stadio bilanciato'

$V_{13} > V_{thr}$ conduce bobina 1

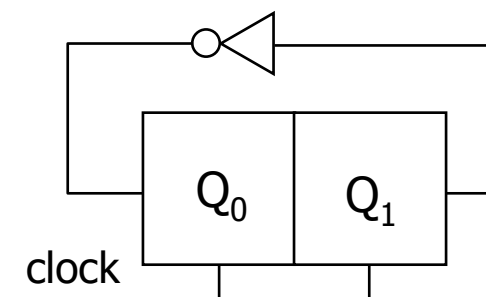
$V_{13} < V_{thr}$ conduce bobina 3

Analogamente per il controllo della coppia 2-4

Il problema è generare le opportune tensioni di controllo V_{13} e V_{24} in modo da rispettare la tabella

1	2	3	4	V_{13}	V_{24}
ON	ON	OFF	OFF	+	+
OFF	ON	ON	OFF	-	+
OFF	OFF	ON	ON	-	-
ON	OFF	OFF	ON	+	-
ON	ON	OFF	OFF	+	+

MOTORE PASSO-PASSO: circuito di comando



Q_0 comanda V_{13} , Q_1 comanda V_{24} : lo shift register inverte l'uscita (Q_1) e la invia, al clock successivo, a Q_0 come previsto in tabella.

Per ruotare in direzione opposta è necessario leggere la tabella dal basso e utilizzare uno shift register reversibile.

1	2	3	4	V_{13}	V_{24}
ON	ON	OFF	OFF	+	+
OFF	ON	ON	OFF	-	+
OFF	OFF	ON	ON	-	-
ON	OFF	OFF	ON	+	-
ON	ON	OFF	OFF	+	+

Non è conveniente un μP perché le frequenze di emissione sono elevate (sovraccarico CPU).

Utilizzo amplificatori per permettere allo shift register il pilotaggio in corrente della porta logica.

MOTORE PASSO-PASSO: osservazioni

- L'attuatore risponde con una velocità al controllo, permettendo di determinare la posizione a partire dal punto iniziale senza bisogno di un trasduttore di posizione (es. dando 100 imp/sec, se la caratteristica del motore è di compiere un giro dopo 200 impulsi, so che lo spostamento impostato è di mezzo giro). Necessità di un fine corsa.

- Questi motori richiedono alimentazioni dell'ordine di qualche V, lavorando con correnti che arrivano fino all'A \Rightarrow r avvolgimenti abbastanza basse; essendo il termine di ritardo dovuto ad un'induttanza pari a L/r , le costanti di tempo in gioco sono abbastanza lunghe. Inoltre L può diventare abbastanza alto se ci fossero parecchi avvolgimenti nelle bobine.

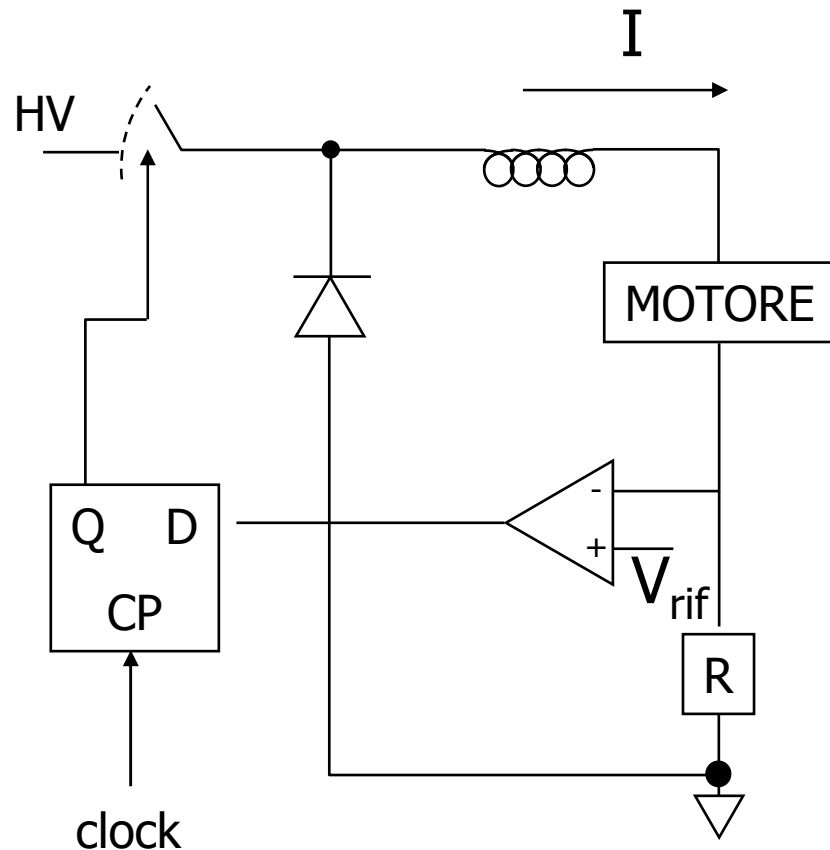
Ad esempio applicando una tensione di comando in modo che la bobina 1 conduca, questa per effetto della sua iniziale 'resistenza' impedirà, almeno in un primo momento, il passaggio della corrente. Ciò significa che sul collettore del Mos si trova circa V_{cc} e che questo impiegherà un ulteriore tempo ad uscire da una situazione di interdizione per andare in saturazione \Rightarrow ok se frequenze non troppo elevate.

Conviene alimentare con tensioni maggiori (\Rightarrow > resistenze, < costanti di tempo): però questo comporta una forte dispersione di potenza sul transistor. Si utilizza una soluzione chopper con opportuni intervalli di accensione e spegnimento (duty cycle regolabile).

- Controllo velocità alte \Rightarrow motore cc. Controllo velocità basse \Rightarrow motore passo-passo. Motore passo-passo per velocità precise.

- Controllo posizione \Rightarrow motore cc+ trasduttore (miglior rendimento) o motore passo-passo se richiesta semplicità di realizzazione.

MOTORE PASSO PASSO: alim. chopper in corrente



Il motore viene alimentato a corrente costante, prodotta da una tensione HV sufficiente a garantire rapide commutazioni.

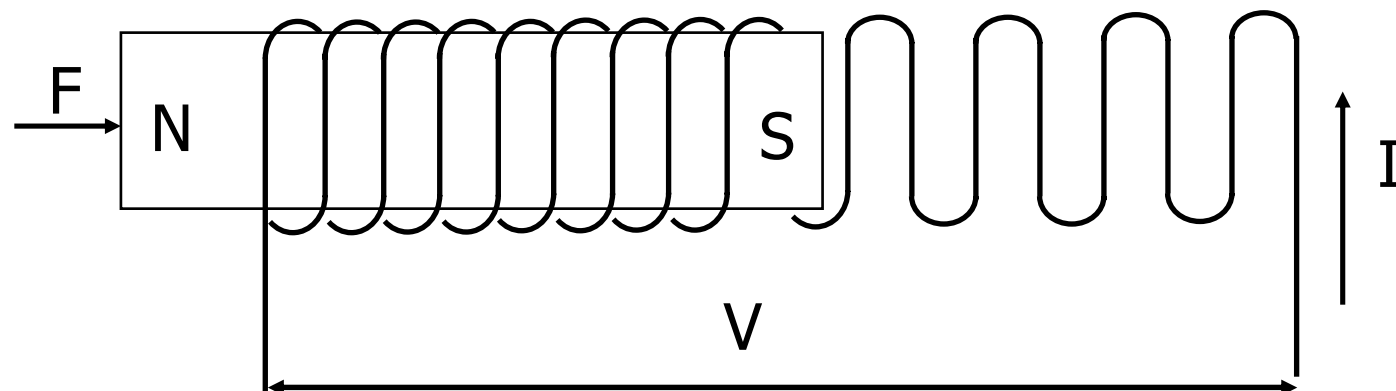
Se la corrente è $< V_{rif}/R$ un flip flop collega il motore ad una tensione dell'ordine del centinaio di V. In alternativa (interruttore aperto), il circuito è chiuso verso massa tramite un diodo.

Il flip flop chiude l'interruttore solo al variare di un clock che consente di regolare gli intervalli di apertura e chiusura.

Proprietà regolarizzatrice dell'induttanza che consente un passaggio graduale alla corrente minore senza "scossoni" per il motore.

Controllo di tipo ON OFF

ATTUATORE ELETTROMAGNETICO



Lavora in modo duale al trasduttore di velocità lineare e converte una corrente in una forza proporzionale.

Barretta di materiale ferromagnetico magnetizzato inserita parzialmente in un solenoide alimentato in corrente.

Il magnete verrà attratto all'interno del solenoide o fatto uscire con una forza F così determinabile:

$$\text{forza elettromotrice } V \text{ indotta nel solenoide} = n\Phi_B v$$

conservazione della potenza $\Rightarrow VI = Fv$ da cui $F = n\Phi_B I$ cioè è possibile controllare con la corrente di alimentazione l'entità e il verso della forza agente sulla barretta.

NB. Se la barretta è di materiale ferromagnetico non magnetizzato, la corrente I nel solenoide magnetizza la barretta sviluppando un flusso magnetico dipendente da I stessa. La forza che ne nasce e che agisce sulla barretta è così proporzionale a $I^2 \Rightarrow$ unidirezionalità di trazione.