



## **Centro Stampa**

**ATTENZIONE QUESTI APPUNTI SONO OPERA DI STUDENTI , NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE. IL NOME DEL PROFESSORE SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

**N° 4450**

**FONDAMENTI ELETTRONICA DI POTENZA  
TEORIA ESERCIZI TEMI ESAME                      2022-23**

**DI CONTI ORNELLA**

# INTRODUZIONE

## AZIONAMENTI ELETTRICI

Si definisce azionamento elettrico, un sistema di conversione efficiente dell'energia elettrica in energia meccanica mediante un motore elettrico alimentato da una unità di potenza. L'azionamento elettrico può essere:

1. Regolabile, il motore può essere alimentato a potenza elettrica variabile per variare una grandezza meccanica di interesse (velocità, posizione, coppia);
2. Non regolabile, alimentazione del motore a tensione e/o frequenza costante.

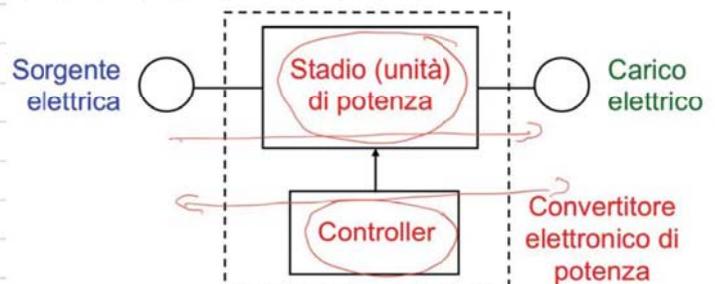
Negli azionamenti elettrici regolabili, ai fini della regolazione, è presente un controller che si occupa di comunicare con l'unità di potenza, in modo da definire quanta potenza elettrica questa deve garantire al carico meccanico.

Negli azionamenti non regolabili, il plesso è più semplice perché la power unit semplicemente attacca o stacca la sorgente elettrica al carico meccanico.

Lavorare con azionamenti regolabili, in particolare a velocità variabili, porta un aumento dell'efficienza di circa il 30%.

## CONVERTITORE ELETTRONICO DI POTENZA

Negli azionamenti regolabili quello che accade, quindi, è una variazione in tensione e/o frequenza dalla sorgente elettrica al carico elettrico, mediante il lavoro congiunto di PU e controller. Questi insieme costituiscono quello che viene comunemente nominato convertitore elettronico di potenza.



L'elettronica di potenza è strettamente collegata all'ambito degli azionamenti elettrici e, più propriamente, si occupa dei circuiti elettronici che determinano lo scambio di potenza elettrica tra sorgente elettrica e carico elettrico, genericamente costituiti da m-fasi in entrata e n-fasi d uscita.

I convertitori elettronici possono essere divisi in macrocategorie a seconda:

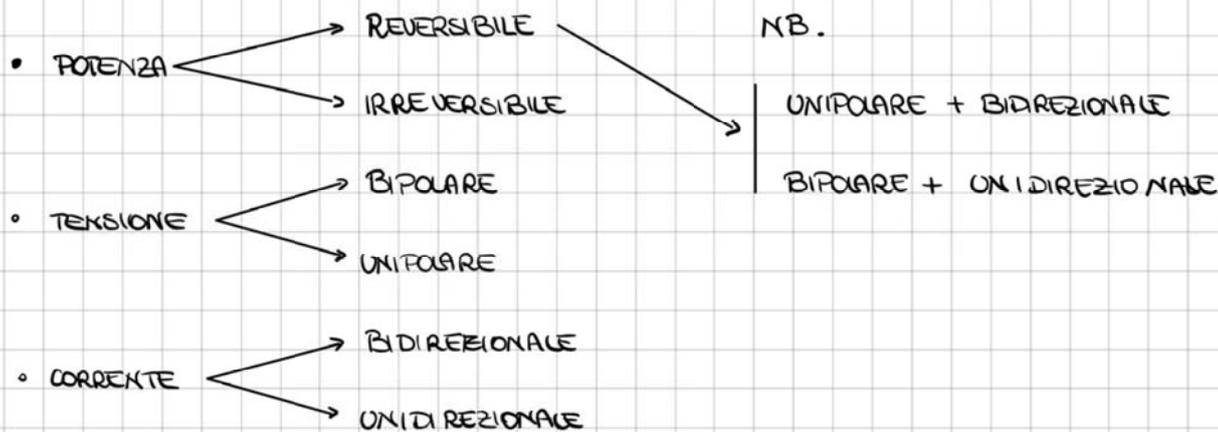
1. Del tipo di conversione;
2. Dell'invertibilità di segno di potenza, tensione e corrente;
3. Del tipo di sorgente considerata.

Per quanto riguarda il tipo di conversione riconosciamo:

1. Convertitori AC/DC o raddrizzatori;
2. Convertitori DC/DC o chopper;
3. Convertitori DC/AC o inverter;
4. Convertitori AC/AC.

Questi ultimi prendono nomi diversi a seconda della conversione. Possono essere definiti parzializzatori di tensione se mantengono la frequenza costante o cicloconvertitori se la frequenza in uscita è maggiore di quella in entrata.

In termini di invertibilità del segno abbiamo visto:



A SECONDA DELLA SORGENTE:

- INGRESSO IN TENSIONE → CONVERTITORE A TENSIONE IMPRESSA CON INGRESSO CAPACITIVO E USCITA INDUTTIVA
- INGRESSO IN CORRENTE → CONVERTITORE A CORRENTE IMPRESSA CON INGRESSO INDUTTIVO E USCITA CAPACITIVA.

Convertitori elettronici di potenza per motori elettrici possono essere a conversione diretta (tra il motore e la rete esiste un unico stadio di potenza) o a conversione indiretta.

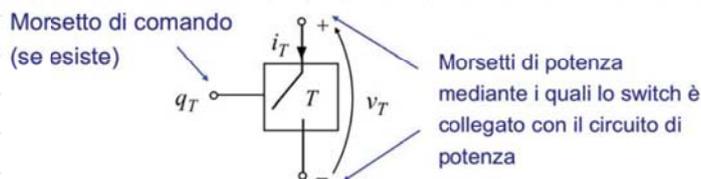
Quando si ha la conversione indiretta sono presenti due convertitori, uno lato carico, l'altro lato sorgente, che comunicano mediante un link in continua, DC link. Se il convertitore lato carico è a tensione impressa, allora il DC link è capacitivo; se il convertitore lato carico è a corrente impressa allora il DC link è di tipo induttivo. I DC link sono unipolari o unidirezionali.

# PRINCIPI DI CONVERSIONE

## DISPOSITIVI ELETTRONICI DI POTENZA

Alla base del funzionamento di dispositivi elettronici di potenza si trovano i dispositivi elettronici di potenza. Questi, genericamente, possono essere assimilati a degli switch, dei tasti, che mediante dei morsetti di potenza sono collegati al circuito e, di solito, presentano un morsetto di comando. Il morsetto di comando è quello che ci permette di definire se lo switch è comandato o non comandato. A seconda della composizione e dell'utilizzo dei diversi tipi di switch nei convertitori questi possono essere definiti:

1. Controllati;
2. Non controllati;
3. Semicontrollati.



Nella pratica gli switch sono dei tasti, che quindi presentano due stadi di funzionamento distinti:

1. Lo stato di ON, tasto chiuso;
2. lo stato di OFF, tasto aperto.

La transizione tra uno stato e l'altro si dice commutazione.

Si è eseguita un'analisi degli switch sia nel caso ideale, sia nel caso reale.

### SWITCH IDEALI

Negli switch ideali nello stato di ON, il tasto è ricondotto alle sembianze di un corto circuito. Questo significa che non presenta un caduta di tensione ai capi, nè tantomeno presenta una propria resistenza. La corrente che può sopportare è infinita e per quanto assunto in precedenza, le perdite in conduzione sono nulle.

Nello stato di OFF, il tasto è rappresentabile come un circuito aperto che, non attraversato da corrente, può sopportare tensione infinita ai propri capi. Anche in interdizione, quindi, non sono registrate perdite. La commutazione dallo stato di ON allo stato di OFF, e viceversa è istantanea, perciò neanche qui si registrano perdite.

### SWITCH REALI

Negli switch reali, nello stato di interdizione, OFF, la corrente che attraversa il componente è minima, tant da poter essere considerata trascurabile. Questo ci fa pensare che non siano presenti perdite in interdizione neanche nel caso reale. Tuttavia, bisogna tenere di conto che la tensione ai capi del componente non deve superare dei valori di limite, ossia, i valori di reverse o direct breakdown.

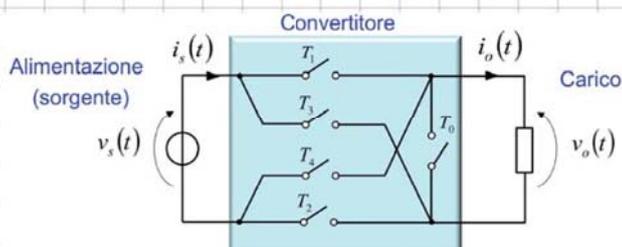
Nello stato di conduzione, ON, non è vero che la corrente. Può raggiungere valori infiniti. Questo perchè limitata dalla presenza della resistenza intrinseca del componente e per il fatto che, data la evidente presenza di perdite di dissipazione, non si può eccedere oltre i limiti della temperatura massima definita da catalogo. Data la presenza di un valore di tensione, detto tensione di soglia, le predite  $P_d$  vengono come di seguito definite:

$$P_d = v_{th} i_d + i_d^2 r_{cd}$$

Nel caso reale, inoltre, la commutazione non avviene in maniera istantanea, perciò saranno registrate anche delle perdite di commutazione.

È importante ricordare che, nel corso dello studio dei circuiti che presentano degli switch, possono essere utilizzate le nozioni di elettrotecnica. Nel caso in cui si devono avere informazioni riguardo l'entrata e l'uscita del circuito gli switched possono essere considerati reali, nel caso di debbano valutare le perdite allora gli switch si considerano reali.

## TPI DI CONVERSIONE



Consideriamo un convertitore di tensione generico costituito da 5 switch ideali  $T_0 \div T_4$ .

Per questo switch vengono definiti tre stati.

1. Se con  $T_0$  chiuso e cortocircuazione

della sorgente,  $V_{out} = 0V$ ;

2. Se con tasti  $T_3$  e  $T_4$  chiusi,  $V_{out} = V_{in}$ ;

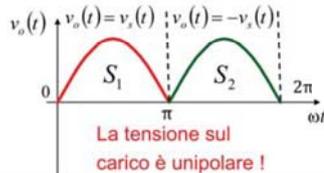
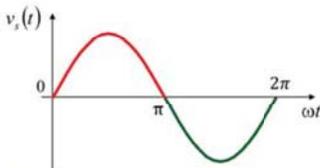
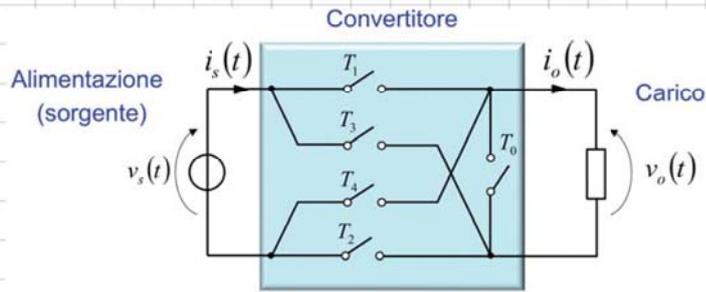
3. Se con tasti  $T_1$  e  $T_2$  chiusi,  $V_{out} = -V_{in}$ .

SFRUTEREMO QUESTO PER L'ANALISI DEI DIVERSI TIPI DI CONVERSIONE.

## CONVERSIONE AC/DC

L'alimentazione è in alternata, tipicamente sinusoidale, il carico è in continua.

$$v_s(t) = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t)$$



UTILIZZIAMO S1 E S2 COSÌ CHE V0 IN

USCITA DA DIVERSO DA 0.

$$V_0 = 2\sqrt{2} V_s / \pi$$

La tensione in uscita  $v_o(t)$  contiene:

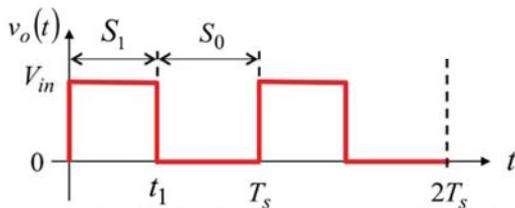
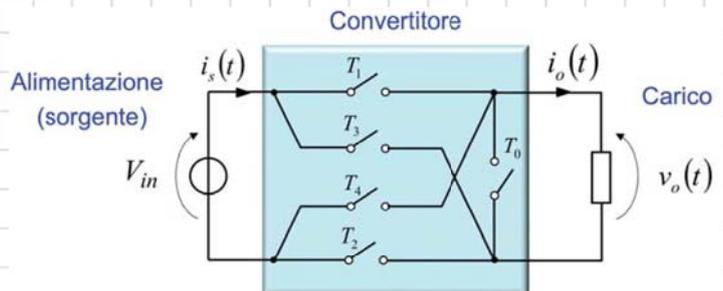
1. una componente continua  $V_0$
2. una componente alternata non desiderata di valor medio nullo

E' possibile regolare la tensione in uscita impostando un ritardo di fase (rispetto agli attraversamenti per lo zero della  $v_s(t)$ ) per l'applicazione degli stati S1 e S2 con o senza l'utilizzo dello stato S0.

## CONVERSIONE DC/DC

L'alimentazione e il carico sono in continua, di solito la tensione in ingresso  $V_{in}$  è considerata costante.

Esistono più combinazioni possibili degli stati disponibili per ottenere una tensione media in uscita variabile. Il più semplice utilizza lo stato S1 insieme allo stato S0 imponendo un funzionamento periodico di periodicità pari a  $T_s$



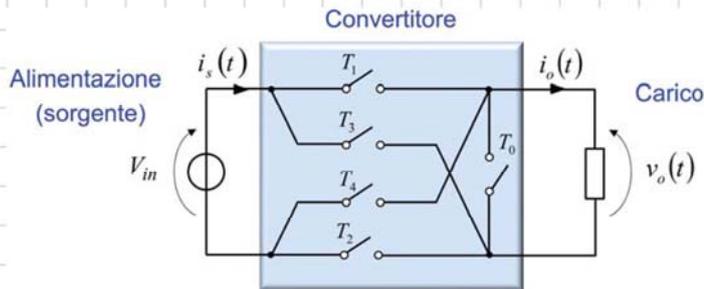
La tensione fornita al carico è una successione di impulsi di ampiezza  $V_{in}$  e contiene:

1. una componente continua  $V_0$ ;
2. una componente alternata (ripple non desiderato) di valore medio nullo.

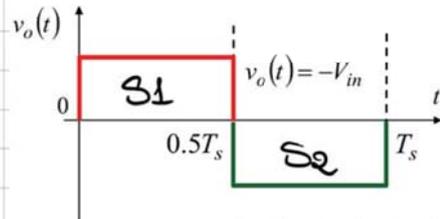
$$V_0 = t_{on} / T_s \quad V_s = d V_s \quad \text{con } d = \text{duty cycle.}$$

IL VALOR MEDIO IN USCITA VIENE MODIFICATO CON MODIFICA DEL duty cycle - PWM.

# CONVERSIONE DC/AC



Il carico è in alternata, mentre l'alimentazione è in continua con una tensione  $V_{in}$  considerata costante.



La tensione fornita al carico è una tensione rettangolare di ampiezza  $V_{in}$  (onda quadra) che contiene:

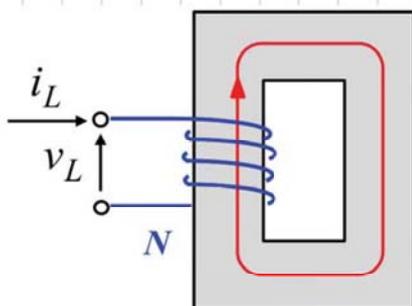
1. un'armonica fondamentale  $v_{o,1}$  di frequenza pari a  $1/T_s$  (componente utile);
2. una componente alternata (ripple).

IL VALOR MEDIO DELLA FONDAMENTALE È  $\frac{2\sqrt{2} V_{in}}{\pi}$

NB CONVERSIONE AC/AC COMPLICATA, LA VEDREMO PIÙ AVANTI.

# ELEMENTI REATTIVI IN ELETTRONICA DI POTENZA

## INDUTTORE



Il primo elemento reattivo che abbiamo analizzato è l'induttore. L'induttore è costituito da un nucleo in materiale ferromagnetico ad alta permeabilità che rappresenta una corsia preferenziale per il flusso.

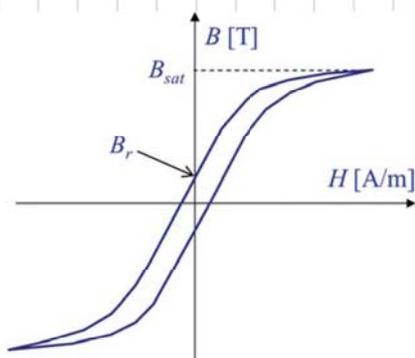
Per il materiale ferromagnetico viene introdotta una relazione tra l'induzione magnetica  $B$  e il campo magnetico  $H$ , il cui rapporto non è lineare, ma definisce un ciclo di isteresi.

$$B(H) - \omega(H) = \mu_0 \mu_r H$$

Quando il conduttore viene percorso da corrente, si percorre un ciclo di isteresi più o meno grande, cui corrispondono le perdite per isteresi che si verificano nel materiale ferromagnetico.

È importante notare che, la corrente non deve superare la corrente massima, oltre la quale si arriva alla saturazione del nucleo, questo per due motivi:

1. Se superiamo la zona lineare, per ottenere significative variazioni di induzione  $B$ , si devono applicare campi  $H$  troppo elevati;
2. Il valore dell'induttanza dipende dalla saturazione e, se questa sale, l'induttanza diminuisce, portando a correnti sempre più elevate.



Nell'induttore viene accumulata dell'energia per unità di volume quale:  $E/V = 1/2 (B^2/\mu_0\mu_r)$   
Tuttavia, dato che la permeabilità relativa del materiale è elevata, l'energia accumulata risulta essere basso. In questo caso, volendo aumentare E, si considera l'introduzione di un traferro. Questo comporta:

1. Riduzione della permeabilità relativa e aumento dell'energia accumulata;
2. Aumento della zona lineare nel diagramma B-H.

## VARIABILE DI STATO

PER IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO IL FLUSSO CONCATENATO  $\hat{\Phi} = L \cdot i_L$

DALLA LEGGE DI LENZ  $v_L = d\hat{\Phi}/dt \rightarrow v_L = L di_L/dt$

DA QUESTO SI RICAHA:

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int v_L(t) dt$$

QUESTO SIGNIFICA CHE:

- IL È LA VARIABILE DI STATO;
- QUALUNQUE SIA LA VARIAZIONE DI TENSIONE IL NON PUÒ VARIARE A GRADINO;
- IL RIPRE DI CORRENTE DIMINUISCE ALL'AUMENTO DI L.
- L FILTRA LA CORRENTE

## COMPORTAMENTO A REGIME

Per il regime DC a valori costanti l'induttore è un cortocircuito, perciò la tensione ai capi dell'induttanza è nulla.

Per il regime AC sinusoidale l'induttore è una reattanza proporzionale alla frequenza, perciò è circuito aperto a frequenza infinita.

## SOVRATENSIONE

Una variazione a gradino della corrente può provocare una sovratensione.

$$v_L = L di_L/dt, \text{ se } di_L/dt \gg \Rightarrow v_L \gg$$

Questo fenomeno si verifica quando l'induttore viene scollegato quando la corrente non si è dissipata quindi previo scaricamento del componente.

ENERGIA :  $E_n = 1/2 L \cdot i_L^2$

## MODELLISTICA

L'induttore nel caso reale viene rappresentato con una resistenza a seguito.

Se si vogliono rappresentare anche le perdite nel ferro si pone in parallelo all'induttore una resistenza fittizia che possa parametrizzarle.

## INDUTTORI ACCOPPIATI

Li induttori non sono fatti solo per essere utilizzati come filtri o come accumulatori di energia. Talvolta questi possono essere utilizzati o è accoppiati, ossia condividere lo stesso circuito magnetico. In questi casi si introduce una grandezza, quale la mutua induttanza,  $M$ .

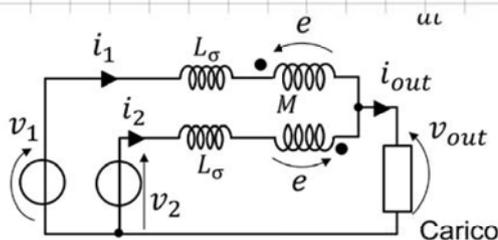
La mutua induttanza indica il livello di influenza mutua che un induttore ha sull'altro ed ha valore comune per entrambi. Questa può essere maggiore di 0 in caso che i flussi prodotti dalle singole induttanze siano concordi al principale (induttori analizzati entrambi in convenzione degli utilizzatori), oppure minore di zero in caso uno dei due induttori concorra al deflussaggio (produce flusso discorde) dell'impianto. In quest'ultimo caso uno degli induttori è analizzato in convenzione dei generatori e l'altro degli utilizzatori.

$$M = \pm N_1 N_2 / \mathcal{R}_p^2$$

Un caso particolare riguarda l'accoppiamento di induttori accoppiati identici, quindi con auto induttanze uguali tra loro, uguali alla somma dell'induttanza di dispersione e  $M$ .

$$L_1 = L_2 = L_\sigma + M$$

IN QUESTO CASO, SE SI CONSIDERA IL CIRCUITO ALIMENTATO NEL MODO SEGUENTE



$$e = M d(i_1 - i_2) / dt$$

$$v_{out} \approx (v_1 + v_2) / 2$$

$v_1 - v_2$  CADE SU 2M CHE SI DEFINISCE

INDUTTANZA DI MODO DIFFERENZIALE.

Un induttore di modo comune aumenta la sua induttanza (aumentando l'impedenza totale di modo comune) vista dalle correnti di modo comune, senza alterare il trasferimento di potenza.

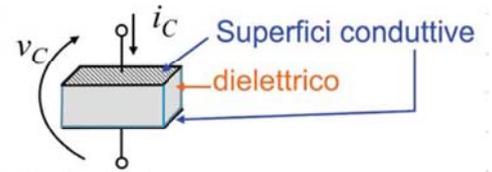
## TRASFORMATORI

I trasformatori impiegati in convertitori elettronici di potenza possono essere trasformatori a bassa frequenza (tipicamente 50 Hz) che costituiscono il collegamento tra i convertitori e la rete industriale, talvolta ingombranti. Talvolta, vi sono trasformatori alta frequenza (> 1kHz) che sostituiscono adattamento/isolamento tra 2 stadi di conversione, di solito sono monofase.

Per i trasformatori ad elevata frequenza sono richiesti bassi valori in perdite, compattezza e ottime prestazioni all'aumentare di temperatura. Quelli che maggiormente si prestano a queste condizioni sono i trasformatori da circuito stampato.

## CONDENSATORI

Il concetto base nella realizzazione di un condensatore è quello di interporre tra due superfici conduttive un elemento dielettrico in grado di sostenere il campo elettrico che viene a costituirsi tra le due superfici conduttive qualora sottoposte ad una differenza di potenziale.



La carica/scarica del campo elettrico comporta un movimento di carica equivalente alla circolazione di una corrente elettrica (corrente di spostamento).

## VARIABILE DI STATO

$$Q = C \cdot V_c(t) \Rightarrow \int i_c(t) dt = C \cdot V_c(t)$$

SI CONCLUDE CHE

$$V_c(t) = V_c(0) + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

QUESTO SIGNIFICA CHE:

- $V_c$  È LA VARIABILE DI STATO;
- QUALUNQUE SIA LA VARIAZIONE DI CORRENTE  $V_c$  NON PUÒ VARIARE A GRADINO;
- IL RIPPLE DI TENSIONE DIMINUISCE ALL'AUMENTO DI  $L$ .
- $C$  FILTRA LA TENSIONE

## COMPORIAMO A REGIME

A regime DC a valori costanti il condensatore è un circuito aperto, per cui la corrente nel condensatore è nulla.

In regime AC sinusoidale il condensatore è una reattanza inversamente proporzionale alla frequenza, perciò è cortocircuito a frequenza infinita.

## ENERGIA

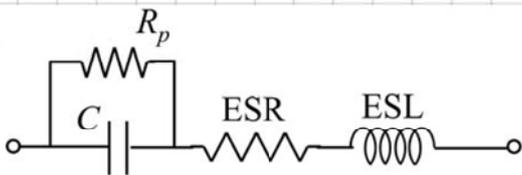
$$E_N = \frac{1}{2} C \cdot V_c^2$$

## SORACORRENTE

Variazioni a gradino di tensione, in maniera del tutto duale per quanto avviene nell'induttore, portano a correnti elevate. Quindi qui il problema non è scollegare il condensatore al circuito, ma collegarlo. Per evitare elevati valori di  $dv/dt$ , e quindi la corrente di inrush, di solito si utilizza un circuito di precarica.

## MODELLISTICA

NEL CASO REALE:



ESR (Equivalent Series Resistance)

ESL (Equivalent Series Inductance)

$R_p$  – resistenza di perdita

ESR limita la corrente efficace del condensatore (riscaldamento dovuto alle perdite)

ESL limita la frequenza di lavoro del condensatore (capacità solo se la frequenza di lavoro è inferiore alla frequenza di risonanza dalla C e dell'ESL)

SI FA LA DISTINZIONE TRA:

• C. ELETTROLITICI O POLARIZZATI

SOLO TENSIONI POSITIVE

CAPACITÀ ELEVATE

• CONDENSATORI NON POLARIZZATI

TENSIONI POSITIVE E NEGATIVE

BASSE CAPACITÀ