

Generazione della tensione per la scintilla

Principio del sistema a scarica induttiva

1 Introduzione

Nella terminologia dei motori a combustione interna con “accensione” si indica l’operazione che provoca la combustione della miscela di aria e combustibile (benzina; gasolio; ecc.); l’accensione avviene mediante innesco da parte di una scintilla elettrica oppure attraverso una forte compressione. Nel primo caso i motori sono detti ad accensione comandata (*spark ignition* in inglese); nel secondo caso i motori sono ad accensione per compressione (*compression ignition* in inglese). l’accensione comandata viene ottenuta facendo scoccare in ciascun cilindro del motore ed al momento opportuno e una scintilla elettrica fra i due elettrodi di un dispositivo detto *candela*.

Per superare la rigidità dielettrica del mezzo interposto fra gli elettrodi della candela è necessario generare, partendo dalla bassa tensione continua della batteria di alimentazione del sistema ausiliario elettrico di bordo, elevate tensioni, vedremo dell’ordine di 10-20 kV.

Il sistema più diffuso per ottenere questo risultato è il meccanismo cosiddetto della scarica induttiva. esso verrà rapidamente illustrato nel presente documento.

2 Meccanismo dell’accensione

2.1 Tensione necessaria all’innesco dell’arco

La tensione necessaria all’innesco di un arco elettrico fra due elettrodi separati da uno spazio d’aria in quiete è funzione di diversi fattori, fra cui i più importanti sono:

- distanza fra gli elettrodi
- temperatura, pressione, umidità dell’aria

Per una certa distanza fra gli elettrodi ed un certo valore di umidità dell’aria l’andamento della tensione di innesco V_s può essere considerata funzione di temperatura e pressione dell’aria:

$$V_s = f_v(\theta, p)$$

E’ anche possibile considerare funzioni in cui la variabile dipendente sia temperatura o pressione:

$$\theta = f_\theta(V_s, p)$$

$$p = f_p(V_s, \theta)$$

Una rappresentazione grafica di queste funzioni può essere ottenuta raffigurando delle curve di livello nel piano delle variabili assunte come indipendenti. Ad esempio in fig. 1, sono riportate, per una distanza interelettrodica di 1 mm, curve di livello nel piano V_s, p e V_s, θ ¹. I grafici riportati in queste curve possono anche essere interpretati come andamento della rigidità dielettrica dell’aria (espressa in V/mm) in funzione della temperatura e della pressione, essendo la distanza considerata fra gli elettrodi proprio di 1 mm.

¹ E’ quasi superfluo osservare che le pressioni riportate sui grafici sono da intendersi espresse in kg/cm² e non kg/cm.

Si rileva che oggi si realizzano alla fine della compressione sono superiori a quelle riportate in figura, dell'ordine di oltre 3 MPa^2 ; corrispondentemente le tensioni di accensione risultano più elevate (superano i 20 kV).

Le temperature che si osservano alla fine della fase della compressione sono di norma nel campo $350\text{-}550^\circ\text{C}$.

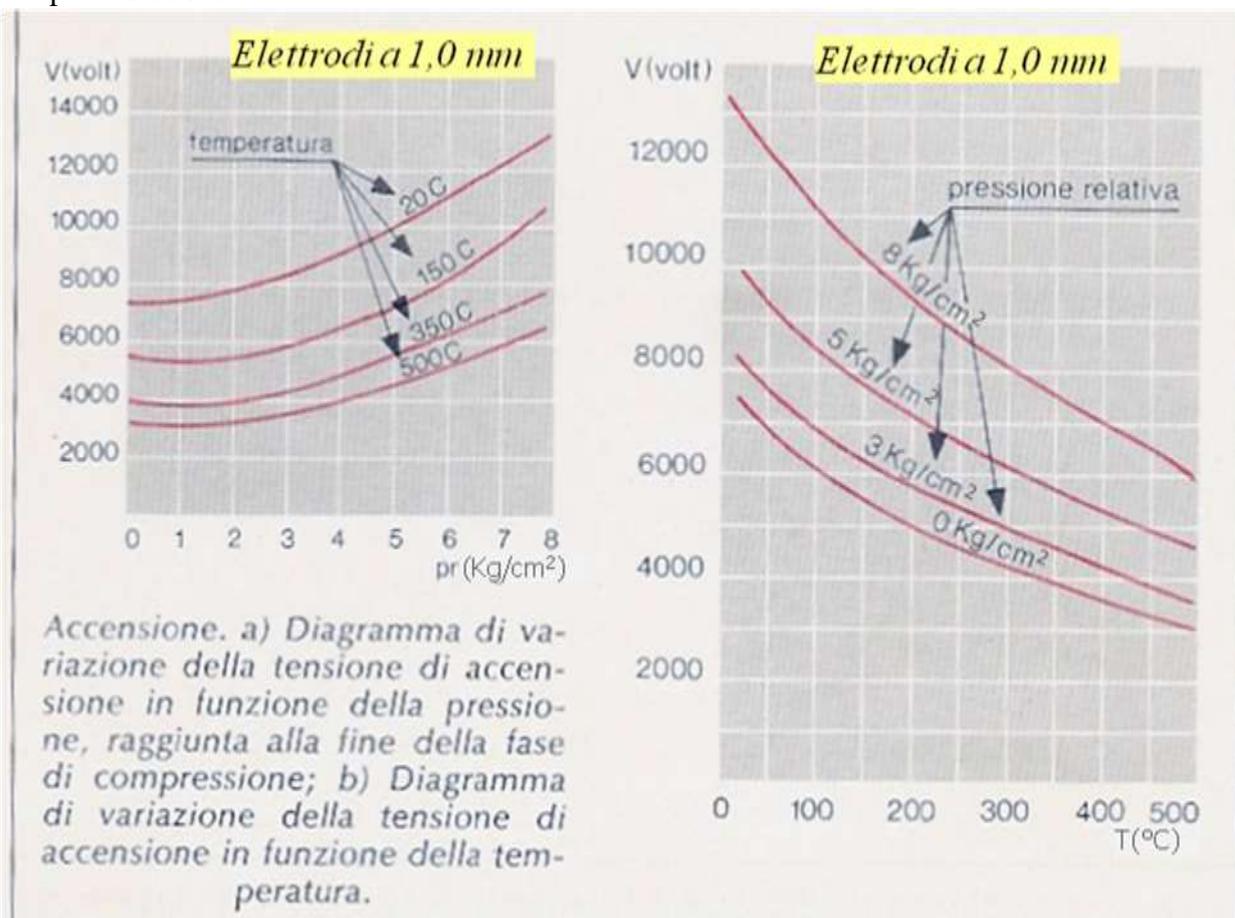


Fig. 1: Tensioni di accensione della miscela in funzione di pressione e temperatura.

Nella pratica motoristica la tensione necessaria può essere superiore per una molteplicità di fattori, fra i quali il principale può essere una aumentata distanza fra gli elettrodi dovuta al loro logorio.

La tensione di innesco è determinata in maniera consistente da particolari caratteristiche degli elettrodi, quali:

- distanza interelettroica. Al decrescere della distanza diminuisce la tensione di innesco, ma diminuisce anche la dimensione della scintilla generata dopo l'innesco (sebbene aumenti la durata della scintilla in quanto la scarica, a parità di altre condizioni, è ad energia costante): la effettiva distanza sarà quindi un compromesso fra queste due opposte esigenze
- configurazione degli elettrodi. Piccole dimensioni degli elettrodi, aumentando a parità di tensione il campo elettrico nello spazio interelettroico, diminuiscono, a parità di altri fattori, la tensione di innesco; evidentemente però questo contrasta con le esigenze di lunga durata degli elettrodi stessi. Sono state studiate forme speciali degli elettrodi, ad es. con un intaglio a V sull'elettrodo centrale, che hanno caratteristiche di innesco superiori a quelle di elettrodi convenzionali;
- materiale degli elettrodi. E' stato visto che anche una opportuna scelta dei materiali con cui costruire gli elettrodi può avere una notevole influenza sul meccanismo di generazione della scintilla, e, in definitiva, sulla tensione d'innesco dell'arco

² Sono ancora in uso unità non appartenenti al S.I. Ad esempio in luogo di 1 MPa si parla spesso di 10 kg/cm^2 .

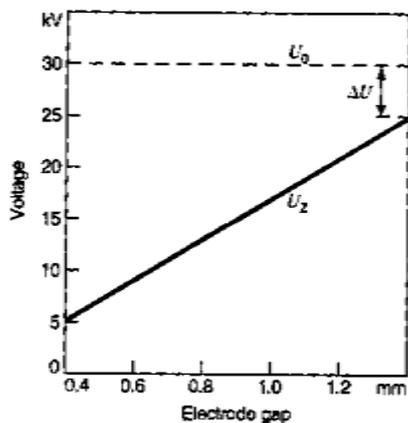


Fig. 2: Andamento della tensione di innesco in funzione della distanza fra gli elettrodi.

La dipendenza della tensione di innesco della scarica alle temperature e pressioni di normale esercizio di un motore a quattro tempi è riportata in fig. 2. Se la tensione U_0 è quella generata dallo spinterogeno ΔU rappresenta un margine di sicurezza disponibile per tutta la vita della candela.

Una volta che la scintilla si è innescata la tensione ai morsetti degli elettrodi scende rapidamente raggiungendo la cosiddetta tensione d'arco pari a circa 400 V, e tale si mantiene per un tempo sufficiente alla piena accensione della miscela aria-benzina (tempo d'arco o *Spark Duration* t_F , cfr. fig. 5 dove si osserva anche come la durata della rampa della tensione sia di circa 30 μs , e il tempo d'arco circa 1,5 ms).

Questo meccanismo si attua soltanto in condizioni di gas quiescente. Velocità elevate della miscela inducono, infatti, considerevoli modificazioni nel meccanismo di accensione; in caso di velocità particolarmente elevate può addirittura capitare l'estinzione e il riadescamento dell'arco durante t_F .

3 Accensione a scarica induttiva: principio di funzionamento

Per generare tensioni dell'ordine di 20-30 kV, seppur con correnti modeste, è necessario elevare di molto la tensione disponibile da parte della batteria, di valore nominale pari a 14 V.

Il meccanismo che si è affermato già da molti decenni per l'ottenimento di questa sopraelevazione di tensione si appoggia a due principi fondamentali che vengono simultaneamente sfruttati:

1. l'oscillazione della tensione su un condensatore facente parte di un sistema $R-L-C$ realizzante un risonatore serie, precaricando di energia l'induttore L ;
2. l'utilizzazione di un trasformatore ad elevato rapporto spire

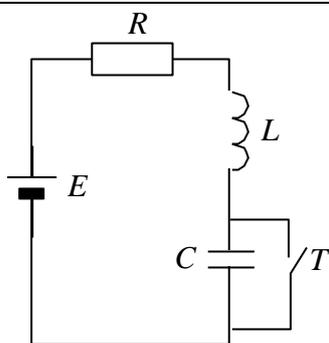


Fig. 3: Schema illustrante il principio della carica di un risonatore serie per la generazione di elevata tensione variabile

Il primo dei due meccanismi di sopraelevazione è illustrato nello schema di fig. 3. Se si chiude il tasto T si attiva un transitorio di circuito $R-L$ in cui la corrente cresce con legge esponenziale, a costante di tempo L/R , fino al valore di regime $I_0=E/R$.

Alla fine del transitorio nell'induttanza L si è accumulata una energia di valore pari a $\frac{1}{2}LI_0^2$

Se a questo punto si apre il tasto T , la corrente che prima lo percorreva devia attraverso il condensatore C , che quindi si carica.

In tal modo inizia un transitorio oscillatorio smorzato in cui l'energia prima accumulata nel solo induttore oscilla fra l'induttore e il condensatore.

L'equazione del circuito è:

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

con la condizione iniziale $i(0)=I_0$ (l'altra condizione iniziale $v_C(0)=0$ è implicita per come è stata scritta l'equazione dell'equilibrio elettrico).

Derivando ambo i membri si ottiene l'equazione

$0 = L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i$ <p>con le condizioni iniziali $i(0)=I_0$ e $di/dt=0$ per $t=0$ ⁽³⁾</p>	(2)
---	-----

Se si trascurano gli effetti dello smorzamento indotto da R , il problema (2) è risolto da:

$$i(t) = I_0 \cos \omega t \quad \text{con } \omega = 1/\sqrt{LC}$$

e, analogamente per la tensione ai morsetti del condensatore:

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{1}{\omega C} I_0 \sin \omega t$$

Questo risultato può essere analizzato agevolmente in termini energetici: l'energia immagazzinata nell'induttore si ripartisce in ogni istante fra quella immagazzinata nell'induttore, pari a $(1/2)LI^2$ e quella immagazzinata nel condensatore, pari a $(1/2)CV^2$. In particolare la massima tensione sul condensatore si ha quando la corrente nell'induttore è nulla ed è ricavabile imponendo l'uguaglianza energetica:

$$\frac{1}{2} CU_{\max}^2 = \frac{1}{2} LI_0^2$$

quindi:

$$U_{\max} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{E}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

che dà ovviamente lo stesso risultato ricavabile dall'espressione sopra ricavata per $v_C(t)$ quando il seno che compare nell'espressione ha valore unitario.

La (3) mostra come sia possibile ottenere ai morsetti del condensatore tensioni di gran lunga superiori a quella della batteria che alimenta il circuito. La tensione V_{\max} è comunque soggetta ad importanti vincoli sia nel caso che il tasto T sia un interruttore meccanico, sia nel caso che si tratti di interruttore elettronico.

Quando il tasto T , supposto per ora di tipo meccanico, si apre, si realizza fra i contatti uno spazio d'aria di dimensioni crescenti nel tempo, fintantoché la distanza fra i contatti aumenta. Corrispondentemente aumenta la tensione massima che può essere applicata fra i contatti senza che fra di essi si inneschi un arco elettrico, il quale è da evitare in quanto dissiperebbe l'energia in precedenza accumulata nell'induttore L , che invece vogliamo si scarichi poi nel cilindro fra gli elettrodi della candela.

Data la velocità limitata di apertura di una coppia di contatti elettrici di tipo meccanico, la necessità di evitare una scarica fra i contatti si traduce quindi nella necessità di evitare una crescita troppo rapida della tensione ai morsetti dell'induttore. Questo induce un limite nella massima frequenza di risonanza del risonatore $R-L-C$ che appare in fig. 3, e quindi un limite al minimo valore del prodotto LC .

Tenendo conto che il valore di L non può essere troppo grande (in quanto, come si vedrà meglio nel seguito, si avrebbero eccessivi tempi di carica) e che C non può essere troppo piccolo per il limite esposto sul prodotto LC , si ha che in pratica U_{\max} non può superare alcune centinaia di volt.

Se si realizza invece il tasto T con un interruttore elettronico, il quale ha una velocità di commutazione molto superiore a quella di un interruttore meccanico, il problema della necessità di limitare la derivata della tensione ai morsetti del condensatore è meno sentito. E' però richiesto che V_{\max} sia inferiore alla tensione di tenuta dell'interruttore che al massimo, utilizzando componenti

³ Questa seconda condizione è interamente valida solo se il transitorio di carica dell'induttore si è completamente esaurito e quindi la corrente è diventata perfettamente costante.

ad alta tensione di tenuta, può raggiungere pochi kV.

Da quanto detto risulta che il solo meccanismo della risonanza presente nel circuito di fig. (3) non è in grado di generare le tensioni necessarie all'innesco della candela, oggi dell'ordine di 20-30 kV.

Si riprende allora il circuito illustrato in fig. 3, e lo si modifica in modo che l'induttanza L è l'induttanza primaria di un trasformatore monofase alimentante gli elettrodi attraverso cui fare scoccare l'arco (fig. 4).

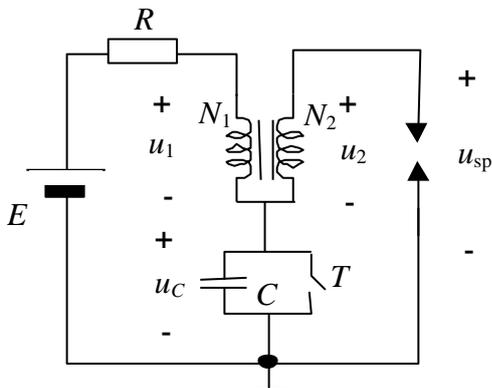


Fig. 4: Generazione di alta tensione con risonatore serie e trasformatore.

In questo caso si utilizza un trasformatore a numero di spire secondario N_2 molto superiore a quello primario N_1 (valori del rapporto spire fra 70 e 100 sono usuali). Il funzionamento del circuito riportato in fig. 4 è il seguente.

Prima che si inneschi la scintilla il trasformatore funziona a vuoto. Dopo l'apertura del tasto T La tensione ai capi del primario è circa uguale e opposta a quella ai capi del condensatore, in quanto entrambe molto superiori in modulo alla tensione di batteria E . Tale tensione varia con legge sinusoidale e pulsazione pari a $\omega = 1/\sqrt{L_1 C}$ (Con L_1 si è ovviamente indicata l'induttanza primaria del trasformatore, come misurabile a secondario aperto).

La tensione indotta sul secondario vale pertanto

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} \approx -u_C \frac{N_2}{N_1}$$

Essa è quindi molto amplificata rispetto a quella sul condensatore e ad essa opposta in segno.

La tensione applicata alla candela vale invece:

$$u_{sp} = u_2 + u_C \approx u_2 \approx -u_C \frac{N_2}{N_1}$$

Essa è quindi in ampiezza sostanzialmente pari a quella presente ai capi del condensatore, moltiplicata per il rapporto spire. Con un rapporto spire di circa 100 e una tensione massima sul condensatore di circa 300 V si ha una tensione secondaria massima di circa 30 kV, come voluto. Il fatto che la polarità della tensione sulla candela sia opposta a quella sul condensatore fa sì che la scintilla si generi con l'elettrodo centrale della candela negativo rispetto a quello laterale, il che favorisce l'innesco della scintilla, come dimostrano studi di dettaglio sulla fisica della scarica elettrica in gas.

Una volta che la scintilla si è innescata essa determina un attraversamento della candela di correnti dell'ordine di 30-100 mA, sotto una tensione di circa 400 V (quindi la potenza assorbita è poche decine di W). Si ha quindi una fortissima caduta di tensione rispetto alla tensione di innesco.

Durante il periodo in cui è presente la scintilla la corrente decade leggermente, e corrispondentemente l'arco si raffredda; in tal modo la resistenza d'arco aumenta di modo che la tensione ai morsetti della candela è circa costante; si arriva ad un punto in cui il raffreddamento è tale che si innesca un rapido fenomeno a catena di aumento di resistenza e decadimento della corrente che porta l'arco rapidamente a spegnersi.

L'andamento della tensione ai morsetti della candela, come riportato in una pubblicazione tecnica specializzata, è presentato in fig. 5. Si nota il primo tratto di crescita della tensione, che è in realtà il primo tratto di un arco di sinusoidi che evolverebbe alla frequenza di risonanza del circuito primario RLC; la rampa generata è dell'ordine di 500 V/ μ s, e quindi tipicamente

l'innesco della scintilla dopo circa $30 \mu s$. La tensione sulla candela rimane circa costante per la durata dell'arco, di circa 1,5 ms. Al disinnesco della scintilla si ha un transitorio di assestamento sul primario, sempre del tipo risonante RLC, che è visibile anche agli elettrodi della candela come oscillazione smorzata.

L'andamento della corrente primaria, come ricavato da altra pubblicazione tecnica, è riportato in fig. 6. In questo transitorio è mostrato il primo tratto di carica della corrente primaria (crescita della corrente di tipo esponenziale negativo), la ripida derivata della corrente all'apertura del tasto T , che determina la tensione secondaria di innesco della scintilla.

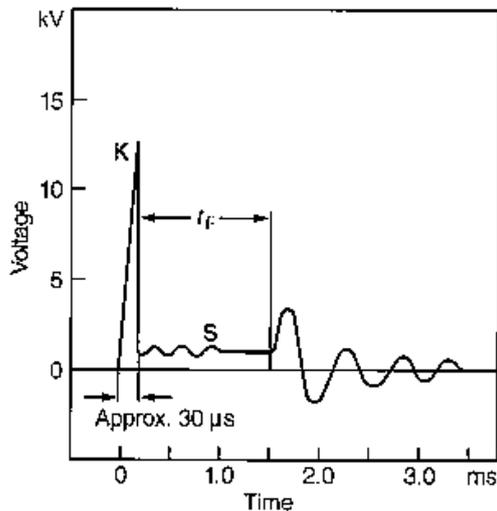


Fig. 5: Tensione agli elettrodi della candela durante la prima parte del ciclo di accensione.

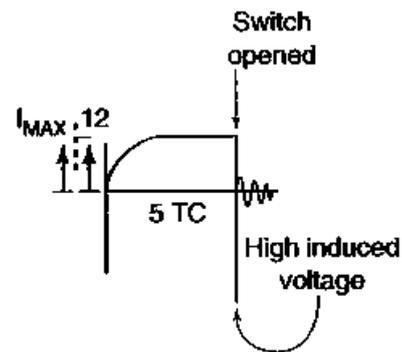


Fig. 6 Corrente di batteria nella prima parte del ciclo di accensione.