

Ecodesign per dispositivi elettronici

UNITA' 10: Ingegneria elettrica

Autore: Andrej Sarjaš

10.1. Ingegneria dell'energia elettrica	2
10.2. Funzionamento in modalità swtch	4
10.3. Elementi dei convertitori Switch	11
10.4. Convertitori Switch.....	20

Sommario del capitolo:

- Principi di conversione di potenza
- Elementi di commutazione nel settore energetico
- Convertitori

10.1. Ingegneria dell'energia elettrica

L'ingegneria dell'energia elettrica fa parte dell'ingegneria elettrica e si occupa della conversione e del risparmio di energia elettrica. Tutti gli apparecchi elettronici sono alimentati da fonti di diversa natura. Queste fonti possono essere autonome e portatili o stazionarie. Le fonti autonome sono tutti i sistemi e dispositivi a batteria che alimentano dispositivi portatili e autonomi. Di solito, i sistemi a batteria sono solo un modo per risparmiare l'energia che viene fornita da sistemi fissi, come la rete elettrica. Le fonti di energia completamente autonome sono sistemi che non dipendono dall'energia delle reti elettriche e convertono l'energia non elettrica in energia elettrica nel punto specificato. Tali fonti sono di vario genere: celle solari, centrali eoliche, ecc.

Relativamente a questo punto, ci si può interrogare su cosa sia la conversione e il controllo dell'energia elettrica. L'energia è necessaria per qualsiasi attività. Capacità e flessibilità dell'elettronica moderna devono essere accettate come nuove sfide per un uso efficiente dell'energia. È fondamentale pensare a come i circuiti elettronici e i sistemi possono essere utilizzati per la conversione e la gestione dell'energia. L'ingegneria energetica comprende lo studio di circuiti elettronici destinati al controllo e alla corrente di energia elettrica. Questi circuiti gestiscono potenze notevolmente superiori al prezzo di ciascun dispositivo. I raddrizzatori sono probabilmente gli esempi più noti di circuiti che rientrano in questa definizione. Convertitore è un termine usato per un certo tipo di circuiti e sistemi che convertono energia. I convertitori sono classificati in base al tipo di input e di energia elettrica in uscita. Conosciamo convertitori AC-DC, DC-DC, DC-AC e questi sono spesso utilizzati come unità di alimentazione di dispositivi elettronici. Come mostrato nell'immagine 1, l'ingegneria dell'energia elettrica presenta il punto centrale in cui i sistemi energetici e l'elettronica classica sono uniti. Ciò è ulteriormente supportato dal fatto che tutti i sistemi di microcontrollo e i circuiti logici digitali necessitano di energia elettrica per il loro funzionamento. Questa energia è generata dall'ingegneria dell'energia elettrica che è il settore chiave dell'ingegneria elettrica. Ogni circuito per la trasmissione e la conversione di energia deve considerare questi problemi da entrambe le prospettive, come controllo e come conversione di energia. I temi principali dell'ingegneria elettrica sono la ricerca sugli elementi dei semiconduttori, l'uso di dispositivi magnetici per il risparmio energetico, i metodi di gestione che fanno parte dei moderni sistemi energetici. In ogni studio di ingegneria elettrica, l'importanza dell'elettronica deve essere presentata dal punto di vista dell'elettronica digitale, analogica e a radiofrequenza che rifletta i metodi caratteristici e le sfide uniche.

Le applicazioni dell'ingegneria elettrotecnica si diffondono in modo esponenziale. Non è possibile costruire computer, telefoni cellulari, automobili, aeroplani, processi industriali e molti altri prodotti di uso quotidiano senza ingegneria energetica. I sistemi di energia alternativa, come i generatori eolici, l'energia solare, le celle a combustibile e altri richiedono l'ingegneria energetica per il loro funzionamento. La tecnologia avanza,



come veicoli elettrici e ibridi, computer portatili, forni a microonde, display a schermo piatto, illuminazione a LED e centinaia di altre innovazioni che non potrebbero essere eseguite fino a quando i progressi dell'ingegneria elettrica non hanno permesso la loro produzione. Sebbene nessuno possa predire il futuro, è chiaro che il motore elettrico di potenza sarà al centro delle innovazioni fondamentali per l'energia.

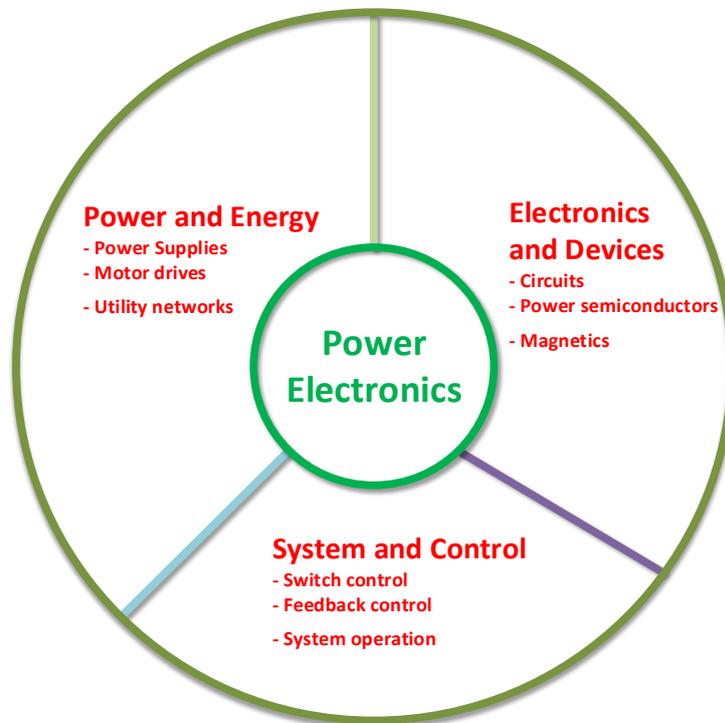


IMMAGINE 1: TEMATICHE DI INGEGNERIA DELLA POTENZA ELETTRICA

La storia dell'ingegneria elettrica è strettamente correlata ai miglioramenti dei componenti elettronici che forniscono il funzionamento con potenze più elevate. Dal 1990 i componenti e i dispositivi sono diventati così sofisticati che è iniziata la transizione dai dispositivi fisici alle applicazioni di programma. Questa transizione si è basata su due fattori chiave:

- Per quasi tutte le applicazioni esistono semiconduttori avanzati ampiamente accessibili.
- La tendenza principale alla miniaturizzazione dei componenti aumenta con il numero di dispositivi e prodotti elettrici.

Sebbene i dispositivi siano ancora in fase di miglioramento, il loro sviluppo segue applicazioni e dispositivi innovativi.

Tutti i circuiti elettronici regolano la corrente di energia elettrica tra la fonte elettrica e il carico. I componenti del circuito devono dirigersi verso le correnti elettriche e non interferire con esse. Il sistema generale di conversione della potenza è presentato nell'immagine 2. La funzione del convertitore di potenza, vista nel centro dell'immagine



2, è il controllo della corrente di energia tra la sorgente e il carico. Nel nostro caso, la conversione di potenza verrà eseguita con il circuito elettronico.

Poiché esiste un convertitore di potenza tra la fonte di energia e il carico, tutta l'energia utilizzata dal convertitore viene distribuita a tutti i componenti all'interno del convertitore. Ecco la vera sfida. Per costruire un convertitore, è necessario utilizzare componenti senza o con perdite ridotte. È opportuno che l'efficienza del convertitore sia vicina al 100%.



IMMAGINE 2: CONVERSIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Anche un convertitore di potenza collegato alla sorgente e al carico influenza l'affidabilità del sistema. Se la fonte di energia è completamente affidabile, il convertitore inaffidabile può influenzare il carico. Un convertitore inaffidabile è visto come una fonte di alimentazione inaffidabile. Il convertitore di alimentazione inaffidabile causa anche l'inaffidabilità dell'intero sistema. Se diamo un'occhiata a questo dal punto di vista della fonte, possiamo dire che la famiglia europea media sperimenta il guasto della rete elettrica solo pochi minuti all'anno. L'energia è disponibile per il 99,9% del tempo. Il convertitore di energia deve essere affidabile perché solo questo può impedire il degrado del sistema. L'applicazione del convertitore ideale non deve causare problemi nella durata del dispositivo. L'alta affidabilità può essere una sfida ingegneristica più difficile rispetto all'elevata efficienza del convertitore. Dal punto di vista della progettazione ecologica dei dispositivi elettrici, i convertitori di energia sono una delle basi per il funzionamento affidabile e l'efficienza del dispositivo. L'efficienza del convertitore influenza il ciclo di vita del dispositivo che è una metodologia importante per valutare l'efficienza ecologica del dispositivo.

10.2. Funzionamento in modalità switch

Il funzionamento dei convertitori di commutazione si basa su interruttori a bassa perdita che sono requisiti estremi per l'ingegneria energetica. Nel caso ideale, quando l'interruttore è acceso, ha una caduta di tensione pari a zero e trasmetterà tutta l'energia al carico senza ulteriori perdite. Se l'interruttore è spento, ha una resistenza illimitata, il che significa che nessuna corrente passerà attraverso l'interruttore. La potenza dell'interruttore è un prodotto di tensione e corrente, il che significa che il prodotto desiderato di entrambi i valori è uguale a zero. Se la potenza è uguale a zero, non



abbiamo alcun uso di energia sull'elemento interruttore nel tempo dato. L'interruttore, quindi, regola la corrente di energia senza dispersioni. L'affidabilità dell'interruttore è fondamentale. Gli interruttori meccanici presenti in una casa possono essere utilizzati anche 100.000 volte nell'arco di un decennio. Sfortunatamente, gli interruttori meccanici non soddisfano tutte le esigenze pratiche. Gli Interruttori elettronici che fanno parte del circuito di alimentazione si interrompono anche più di 100.000 volte in un secondo. Anche i migliori interruttori meccanici non resisteranno a più di un milione di cicli. Gli interruttori elettronici che fanno parte del circuito di alimentazione commutano anche più di 100.000 volte in un secondo. Anche i migliori interruttori meccanici non resisteranno a più di un milione di cicli. Per tal motivo, si utilizzano interruttori a semiconduttore nei convertitori.

Il concetto di sistema di conversione è presentato nell'immagine 3. Il sistema di conversione è costituito da quattro unità separate, che sono:

- Fonte di energia
- Circuito di Potenza del convertitore
- Unità per la Gestione del convertitore
- Carica

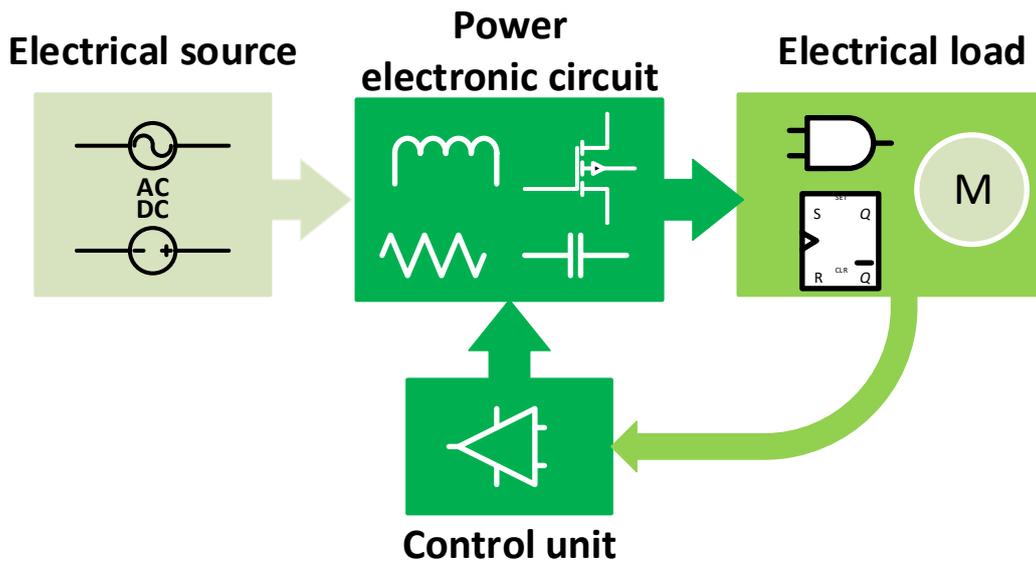


IMMAGINE 3: SISTEMI DI CONVERSIONE

Una delle fonti di energia nel dispositivo elettronico può essere la tensione di rete, la batteria o altre fonti alternative. I circuiti di alimentazione differiscono per il tipo di convertitore che è differenziato in base alla tensione di ingresso e di uscita, come mostrato nell'immagine 4. Si conoscono convertitori che convertono la corrente alternata in unidirezionale (AC-DC - corrente alternata in corrente continua). Il tipo di convertitore AD-DC viene spesso utilizzato in circuiti elettronici alimentati dalla rete



elettrica e richiedono una corrente a senso unico per il funzionamento (circuiti logici, circuiti analogici unidirezionali, microcontrollori, sistemi informatici, ecc.). Il convertitore AC-DC è anche noto come raddrizzatore.

Un altro tipo è rappresentato dai convertitori DC-DC (corrente continua a corrente continua). Questi sono usati per aumentare o diminuire la corrente a una via. I circuiti elettronici e gli elementi integrati per il loro funzionamento necessitano di diversi potenziali di tensione. Con l'uso di convertitori DC-DC, integriamo i potenziali di tensione nei circuiti elettronici (i potenziali di tensione più comuni sono 12 V, 3,3 V, 5 V).

L'ultimo tipo di convertitore è convertitori DC-AC (corrente continua a corrente alternata). Questi sono anche noti come invertitori di potenza e vengono utilizzati per la conversione della corrente alternata in corrente alternata. Sono spesso utilizzati in motori elettrici alternati con velocità regolabile e conversione di energia da fonti alternative, come la centrale solare.

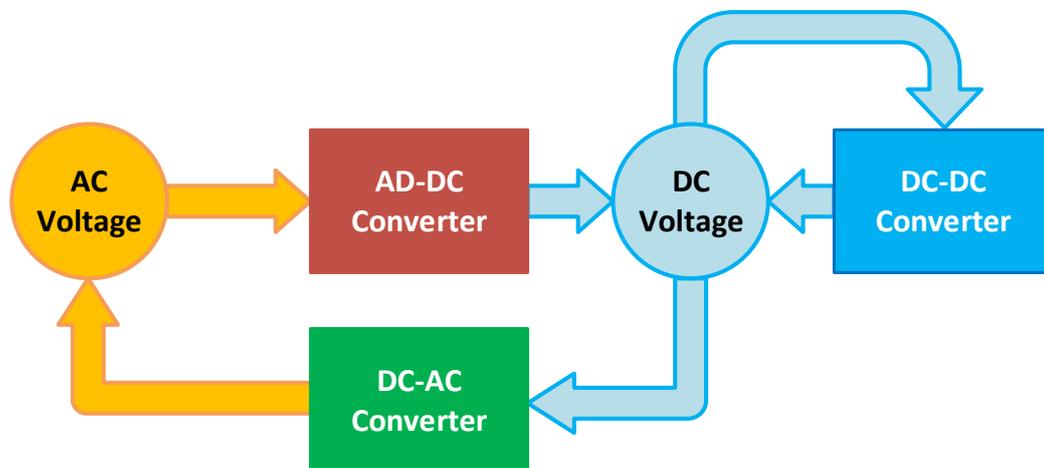


IMMAGINE 4: TIPOLOGIE DI SISTEMI DI CONVERSIONE

L'unità di controllo del convertitore può essere sotto forma di circuito analogico o con un microcontrollore. L'unità di controllo è responsabile del controllo degli interruttori a semiconduttore, in base all'uscita del convertitore desiderata. Questo può essere il livello di tensione, lo sfasamento o la frequenza del segnale periodico. Il tipo di carico condiziona il funzionamento del convertitore e il suo controllo. Ad esempio, conosciamo il carico induttivo o capacitivo che causa i bordi di tensione o corrente e carichi semplici ohm che non hanno un aspetto di transizione distintivo. Spesso vediamo carichi misti che hanno resistenza, induttività, ma anche capacità. I carichi induttivi noti sono motori, relè e contattori di potenza. Tutti gli elementi del convertitore sono progettati in modo da ridurre al minimo le perdite di energia. I dispositivi di commutazione vengono scelti in base alle loro capacità e al trasferimento di energia desiderato, che viene indicato come prodotto di corrente e tensione. Questo è in opposizione ad altre applicazioni elettroniche a cui di solito dichiariamo la perdita di potenza. Ad esempio, il tipico ricevitore stereo esegue la conversione della tensione alternata in ingresso all'uscita audio. La maggior parte degli amplificatori audio non



utilizza tecniche di ingegneria dell'energia elettrica in cui i componenti a semiconduttore fungono da interruttori. L'amplificatore commerciale da 100 W è generalmente progettato con transistor che sono abbastanza grandi da trasferire 100W di potenza. I dispositivi a semiconduttore sono utilizzati principalmente per la ricostruzione del segnale audio, ma non per la manipolazione di correnti energetiche che causano perdite significative. L'amplificatore per l'home theater funziona con efficienza inferiore al 10%. Contrariamente a questo tipo di amplificatori, ce ne sono altri che usano tecniche di ingegneria dell'energia elettrica per la conversione di potenza. Queste tecniche forniscono alta efficienza. Il sistema Home Theater che utilizza amplificatori di commutazione può raggiungere anche il 90% di efficienza energetica e avere dimensioni ridotte. Spesso questo tipo di amplificatori non ha bisogno di elementi di raffreddamento aggiuntivi e sono integrati in un unico chip. Gli amplificatori possono persino essere integrati direttamente negli altoparlanti.

I convertitori di switch possono raggiungere una potenza elevata e sono meccanicamente relativamente piccoli. Diamo un'occhiata a due esempi:

Switch NTP30N20 è un transistor a ossido di metallo con corrente consentita 30A e tensione 200V. L'interruttore di potenza di dissipazione massima consentita è di 200 W con l'adeguato sistema di raffreddamento (costola o ventola di raffreddamento) o 2,5 W senza raffreddamento. Nella teoria dell'ingegneria elettrica, la potenza nominale è di $30 \text{ A} \times 200 \text{ V} = 6 \text{ kW}$ di energia dalla sorgente al consumatore. NTP30N20 funziona in modalità di commutazione, ovvero è completamente aperto o chiuso. La dissipazione di potenza è relativamente bassa e si verifica principalmente nel tempo di commutazione.

Molti produttori utilizzano NTP30N20 per la gestione di diversi elettrodomestici, come frigoriferi, condizionatori d'aria e altri strumenti industriali. Come accennato in precedenza, l'energia trasferita attraverso l'interruttore è significativamente più alta del livello di potenza nominale dell'interruttore stesso. L'interruttore è adatto per il trasferimento di energia fino a 6kW e energia propria di massimo 200W. Il rapporto di potenza è 30: 1, che è relativamente alto, ma non insolito nel contesto dell'ingegneria elettrica. Se confrontiamo l'esempio dato di un amplificatore audio che non funziona nella modalità switch, è necessario garantire che l'energia trasferita sia quasi uguale o addirittura superiore alla potenza della propria dissipazione di transistor.

Possiamo dare un'occhiata ad un altro esempio; IRG6S60B120KD è un transistor bipolare con gate isolati (transistor bipolare con gate isolato IGBT) sviluppato appositamente per l'ingegneria energetica elettrica e funzionante in modalità switching. I suoi valori nominali sono 1200V e 120A. Il suo potere trasferito equivale a 144kW, che è sufficiente per controllare un'auto elettrica o ibrida. È interessante notare che la sua dissipazione è di soli 500 W, il che significa che il suo rapporto con la potenza trasferita è 288: 1.

Le applicazioni di potenza ci portano a domande e sfide interessanti. Nei convertitori in cui la parte principale sono interruttori a semiconduttore a bassa perdita,



spesso manipolano con capacità di dissipazione di potenza di 30 volte. Questo significa che abbiamo solo una perdita di circa il 3%. Un piccolo errore nella progettazione può causare perdite di calore impreviste o un piccolo cambiamento nella disposizione degli elementi può ridurre drasticamente l'efficienza del convertitore. Ad esempio, se la perdita è del 4% anziché del 3%, la tensione nel dispositivo è maggiore del 33%, il che comporta conseguentemente un guasto o un errore del dispositivo. La progettazione di convertitori di potenza può essere riassunta con tre sfide principali:

- La prima sfida è l'affidabilità dei circuiti elettronici di potenza. Si devono rispettare in modo rigoroso la tensione nominale, le correnti e la potenza erogata dal dispositivo. La potenza deve sempre restare entro i limiti. Ciò è particolarmente importante quando si gestiscono potenze elevate.
- La seconda sfida è la semplicità del circuito. Nei circuiti elettronici, è noto che più elementi contengono, maggiore è la possibilità di errore o fallimento del sistema completo. I circuiti di ingegneria elettrica di solito hanno molti componenti, in particolare i principali rami energetici. Per ottenere l'efficienza del convertitore, è molto importante scegliere i componenti principali in modo ragionevole. Ciò significa che sofisticate strategie di gestione sono implementate con semplici circuiti elettronici.
- La terza sfida è l'integrazione. Uno dei modi per evitare il compromesso tra affidabilità e complessità è l'integrazione di componenti e funzioni più grandi in un unico substrato. Ad esempio, il microprocessore può contenere milioni di porte. Tutte le interconnessioni e i segnali stanno correndo all'interno del chip e l'affidabilità dipende da un solo componente. Una tendenza importante nell'ingegneria dell'energia elettrica è lo sviluppo di moduli integrati. I produttori stanno cercando modi per integrare quanti più componenti importanti in un unico modulo possibile. La miniaturizzazione dei componenti crea anche nuove sfide. Molti elementi a semiconduttore contengono fili di rilegatura piccoli che possono essere sensibili a danni da calore o vibrazioni. Le geometrie più piccole possono anche aumentare i disturbi elettromagnetici tra i componenti interni.

Due tendenze in particolare stanno accelerando lo sviluppo dell'ingegneria elettrica. Da un lato, abbiamo un microprocessore ad alta capacità, chip di memoria e altri circuiti digitali avanzati che aumentano le capacità del convertitore a bassissima tensione. Qui possiamo evidenziare l'alimentazione di potenti processori, dove i requisiti attuali sono 100 A a solo 1V. In tali sistemi, abbiamo anche requisiti di carico e tempo variabili in micro o nanosecondi. Al contrario, abbiamo molti dispositivi portatili alimentati da diversi tipi di batterie ricaricabili. Gli alimentatori per questi dispositivi devono essere efficienti ea basso costo. Attualmente, alimentatori e caricabatterie in questi dispositivi hanno perdite relativamente alte e bassa efficienza. A causa di ciò, le esigenze e gli sforzi di oggi sono orientati verso miglioramenti dell'efficienza e riduzione del consumo di energia. Gli standard di efficienza, come il programma EnergyStar,



impongono requisiti rigorosi per un ampio spettro di alimentatori a bassa tensione. In passato, i fornitori di energia lineare erano realizzati con trasformatori e raddrizzatori che convertivano la tensione CA in corrente continua. Verso la fine degli anni '60, l'uso di fonti unidirezionali nell'industria aerea e spaziale ha portato allo sviluppo di convertitori di energia elettrica a commutazione. In un convertitore di commutazione ben progettato, la sorgente di tensione alternata dalla rete viene rettificata senza trasformazione diretta, come nei convertitori lineari. L'elevata tensione unidirezionale è un convertitore con un convertitore CC-CC al livello di tensione prescritto. Il personal computer richiede spesso diversi livelli di alimentazione (3,3 V, 5 V, 12 V) e 1 V per il processore. Solo i convertitori di switch possono fornire diversi livelli di tensione.

Risulta molto interessante il confronto tra convertitori analogici e switch. I convertitori di switch sono visti come dispositivi con alta efficienza, dimensioni ridotte e potenza elevata rispetto ai convertitori lineari. Inoltre non hanno bisogno di un sistema di raffreddamento complesso. Ma questi dispositivi sono più complessi di quelli lineari e causano una tensione di uscita corrugata, che impedisce l'uso di determinate applicazioni precise. I convertitori lineari sono oggi il più usati per potenze inferiori come stabilizzatori di diversi componenti elettronici. Ecco alcune caratteristiche di entrambi i gruppi.

- **Alimentatori DC lineari:** sono stati ampiamente utilizzati fino alla fine degli anni '70. Con l'avanzamento tecnologico degli alimentatori switching, gli alimentatori lineari sono oggi meno popolari ma ancora utilizzati in applicazioni che richiedono una tensione di uscita non corrugata e stabile. Gli alimentatori lineari utilizzano un trasformatore di grandi dimensioni per la trasformazione di alta tensione CA a bassa tensione CA. I passaggi successivi alla trasformazione sono circuiti raddrizzatori e filtri diversi che creano tensione CC a bassa frequenza. La bassa tensione unidirezionale viene quindi regolata al livello indicato con stabilizzatori di tensione. Le applicazioni tipiche dei sistemi di alimentazione lineare sono:
 - a) Tecnologia audio, mixer da studio.
 - b) Amplificatori a basso rumore.
 - c) elaborazione del segnale.
 - d) Raccolta dati con convertitori ADC.
 - e) Gestione ad anello chiuso.
 - f) Attrezzature di laboratorio precise.

- **Commutazione degli alimentatori DC:** sono stati introdotti per la prima volta alla fine degli anni '70 e oggi sono il tipo più diffuso di alimentatori DC sul mercato a causa dell'eccezionale efficienza energetica. Il raddrizzatore di commutazione regola la tensione di uscita con la modulazione della larghezza d'impulso PWM. La tecnica PWM crea disturbi ad alta frequenza ma consente di produrre una tensione elettrica con un'efficienza energetica molto elevata. Con un buon design, la tensione di



commutazione ha una grande regolazione di disturbi e carico di linea. Le applicazioni tipiche per gli alimentatori DC switch sono:

- a) Applicazioni ad alta tensione e corrente.
- b) Dispositivi mobili e di comunicazione.
- c) Carica della batteria per diversi dispositivi e veicoli.
- d) Motori unidirezionali.

L'immagine 5 presenta un convertitore di tensione lineare DC-DC da 5 V.

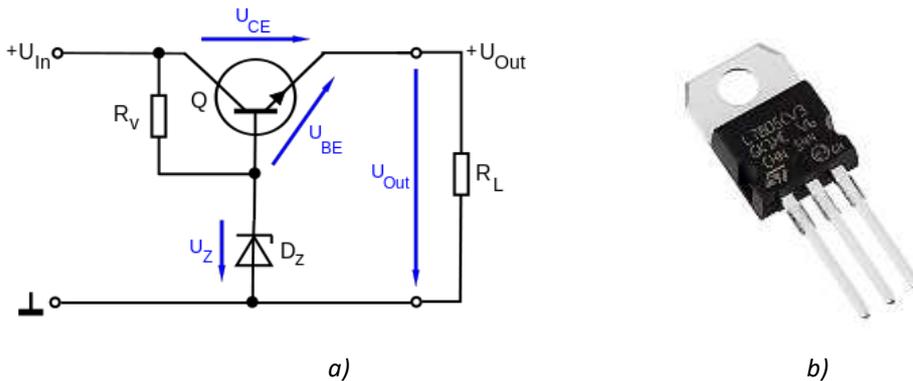


IMMAGINE 5: A) SCHEMA CONVERTITORE DI TENSIONE LINEARE, B) PRODUZIONE DI CONVERTITORE 5V IN ALLOGGIAMENTO TO-220.

Come visto nell'immagine 5, il diodo Zener stabilizza la tensione di uscita, vale a dire che l'eccedenza di tensione viene spesa per la resistenza R_v .

Questo è il motivo principale del surriscaldamento del convertitore che spesso richiede un raffreddamento appropriato per un funzionamento affidabile a correnti più elevate e una maggiore tensione di ingresso. Ad esempio, se vogliamo stabilizzare l'alimentazione 5 V all'alimentazione a 12V, la differenza di tensione 7 V sarà spesa per la resistenza R_v . Lo schema elettrico del regolatore di tensione è presentato nell'immagine 6.

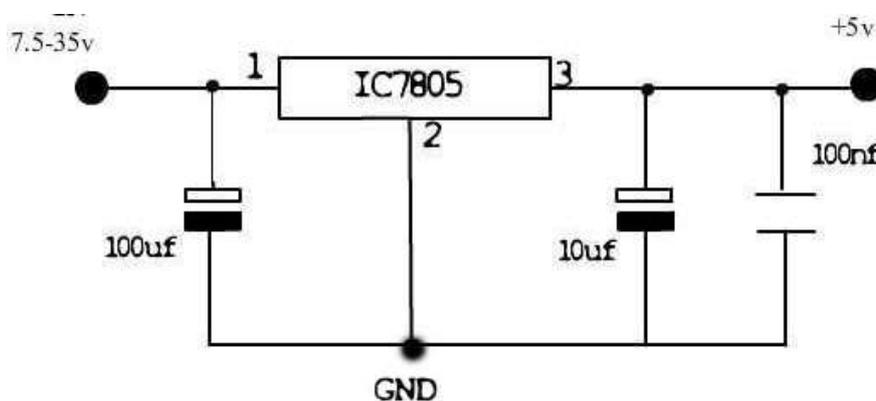


IMMAGINE 6: SCHEMA DI COLLEGAMENTO DEL REGOLATORE DI TENSIONE.



L'immagine 7 presenta un convertitore DC-DC di commutazione.

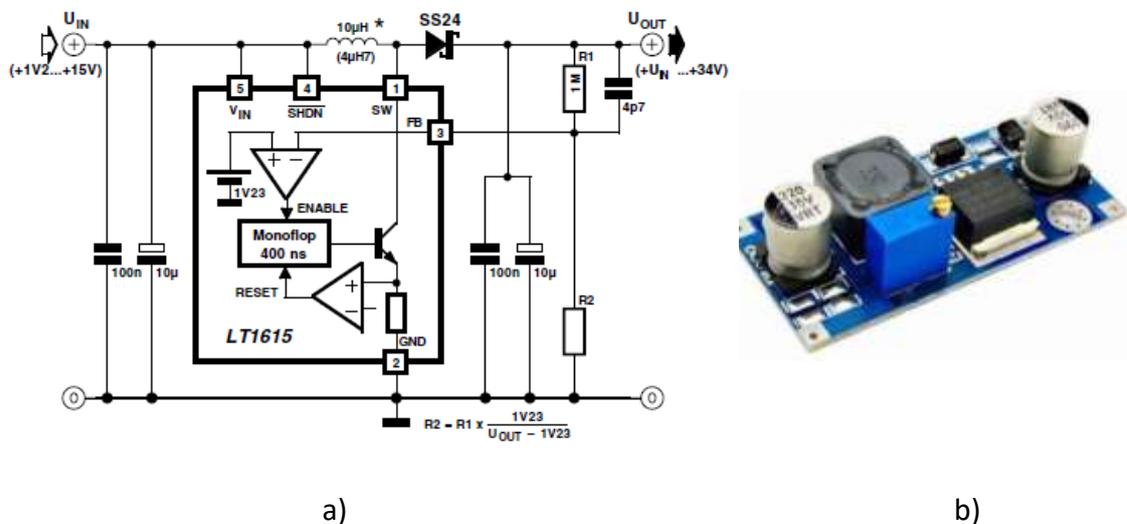


IMMAGINE 7: A) COMMUTAZIONE SCHEMA CONVERTITORE DC-DC, B) ASPETTO FISICO CONVERTITORE DC-DC.

10.3. Elementi del convertitore Switch

Gli interruttori elettronici che sono in grado di gestire tensioni e correnti elevate nella gamma ad alta frequenza sono gli elementi più importanti nella progettazione di sistemi per la conversione di energia. Quindi, quale interruttore è l'ideale? L'interruttore elettronico ideale può essere un dispositivo con tre connettori, come mostrato nell'immagine 8.

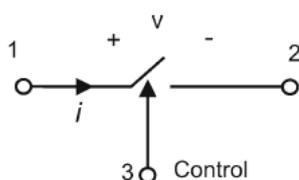


IMMAGINE 8: INTERRUTTORE IDEALE.

Possiamo vedere input, output e clamp di controllo. Il connettore di controllo controlla l'interruttore in modalità aperto / chiuso (ON / OFF). Interruttore ideale significa che nella modalità aperta non c'è resistenza e nella modalità chiusa c'è una resistenza infinita. Questo interruttore cambia immediatamente la condizione, quindi il tempo necessario per passare da ON a OFF o OFF a ON è zero. Gli interruttori effettivi presentano limitazioni in tutte le caratteristiche che sono state menzionate nell'interruttore ideale. Ad esempio, quando l'interruttore è attivo, abbiamo una caduta di tensione, il che significa che ha una certa resistenza. Quando è spento, è possibile che



si verifichi una perdita di corrente, il che significa che non ha una resistenza infinita. Anche il tempo di commutazione non è infinitamente veloce. Come conseguenza delle caratteristiche degli interruttori non ideali, la tensione e la corrente sono sempre presenti nell'interruttore e, di conseguenza, vi sono due tipi di perdite. Il primo tipo di perdite si verifica tra le modalità ON e OFF e sono note come perdite di commutazione. Il secondo tipo sono le conseguenze della propria resistenza dell'interruttore che si verifica durante l'apertura o la chiusura. Queste perdite sono il trasferimento e perdite perdite.

Il concetto dell'interruttore ideale è importante per la valutazione del circuito. I presupposti relativi a caduta di tensione nulla, perdite di corrente e occorrenze di commutazione facilitano la simulazione e la modellazione sul comportamento di diversi convertitori. A seconda delle caratteristiche dello switch ideale ci sono tre classi di interruttori di potenza:

Interruttore non controllato: l'interruttore non ha connettore di controllo. La modalità di commutazione è determinata da una tensione esterna o da condizioni del circuito di corrente in cui si trova l'interruttore. Un esempio di tale interruttore è un diodo.

Interruttore semi-controllato: in questo caso, il progettista del circuito ha un controllo limitato sull'interruttore. Ad esempio, l'interruttore può essere attivato con il connettore di controllo, ma quando è chiuso, non può essere sbloccato con il segnale di controllo. L'interruttore può essere disattivato in base allo stato del circuito corrente o con l'elettronica di controllo aggiunta che forza lo switch a spegnersi. Un esempio di questo interruttore è tiristore.

Interruttore completamente controllato: l'interruttore può essere attivato o disattivato tramite il connettore di controllo. Esempi di questo interruttore sono transistor bipolare BJT, transistor MOSFET e transistor IGBT.

10.3.1 Interruttore non controllato

Il diodo è anche conosciuto come raddrizzatore ed è un interruttore non controllato. È un elemento con due connettori, visto nell'immagine 9. I connettori sono anodo (A) e catodo (K). Nel caso ideale, la corrente di diodo (i_d) è a senso unico, il che significa che la corrente passa solo dall'anodo al catodo.



IMMAGINE 9: SIMBOLO DI DIODO A SEMICONDUTTORE E STRUTTURA A SEMICONDUTTORE.

La tensione di diodo V_d viene misurata come la tensione tra anodo e catodo. Le caratteristiche del diodo U-I sono presentate nell'immagine 10. Nel primo quadrante, il diodo è in modalità aperta, il che significa che sta conducendo. Sul diodo, abbiamo una



piccola caduta di tensione che dipende dal tipo di semiconduttore utilizzato nel diodo. La caduta di tensione sul diodo di silicio è 0,7 V e nel diodo al germanio circa 0,3 V. La corrente del diodo cambia in modo esponenziale con la tensione del diodo. Nel terzo quadrante, il diodo è chiuso, il che significa che non vi sono perdite minime di corrente o corrente. Le caratteristiche del diodo ideale sono mostrate nell'immagine 10 b).

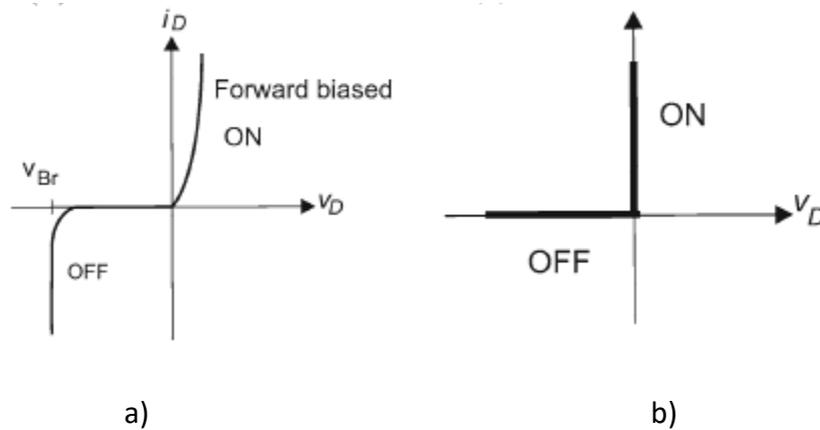


IMMAGINE 10: CARATTERISTICA DEL DIODO U-I: A) REALE, B) IDEALE.

10.3.2 Interruttore semi controllato

Tiristore o SCR è un interruttore a semiconduttore che può essere aperto con gate di controllo. Quando l'interruttore è acceso, non può essere disattivato tramite il morsetto di controllo e il tiristore funziona come un diodo. Ciò significa che il tiristore è classificato come un interruttore semicontrollato. L'immagine 11 presenta un simbolo di tiristore. Anche se ci sono alcune somiglianze tra tiristore e diodo, il tiristore funziona in modo diverso. La corrente di tiristore sta correndo dall'anodo al catodo e la tensione del tiristore v_{AK} è positiva, che è presentata nella caratteristica U-I nell'immagine 12 a).

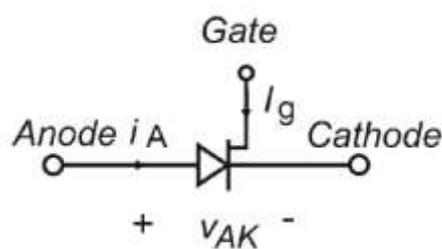


IMMAGINE 11: SIMBOLO DEL TIRISTORE.

Nel quadrante uno è visibile che il connettore di controllo del tiristore non conduce senza corrente. Nel caso in cui la corrente passa attraverso il connettore di controllo, il tiristore inizia a condurre e ha una caratteristica molto simile a un diodo ordinario. Nel quadrante tre, tiristore non conduce, il che significa che è chiuso. Il tiristore qui ha una caratteristica simile a un diodo. Sebbene la caratteristica del tiristore sia simile, possiamo vedere alle caratteristiche degli interruttori che la tiristore



trasferisce una tensione maggiore quando è chiusa. L'alta tensione chiusa è importante per diversi sistemi di alimentazione, come i convertitori AC-AC.

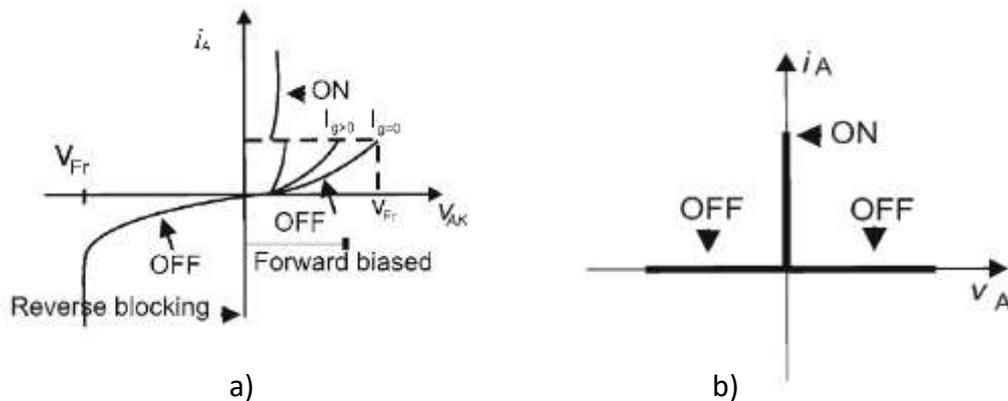


IMMAGINE 12: U-I CARATTERISTICA DEL TIRISTORE: A) REALE, B) IDEALE.

Dalla caratteristica del tiristore nell'immagine 12 possiamo vedere che la corrente va solo in una direzione. Conosciamo anche un elemento simile che è anche un interruttore a semiconduttore, con la differenza che la corrente va in entrambe le direzioni. Questo elemento è il triac, visto nell'immagine 13. Consiste di due tiristori collegati in senso inverso. La caratteristica U-I del triac è presentata nell'immagine 14. Con il connettore di controllo, possiamo controllare la commutazione simmetrica in semiperiodo positivo e negativo del segnale di ingresso. Il triac viene utilizzato principalmente per il trasferimento di potenze inferiori, come il controllo del motore monofase, il sistema di regolazione, ecc.

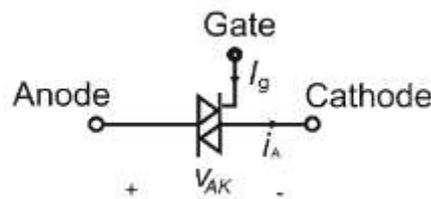


IMMAGINE 13: SIMBOLO DI TRIAC.



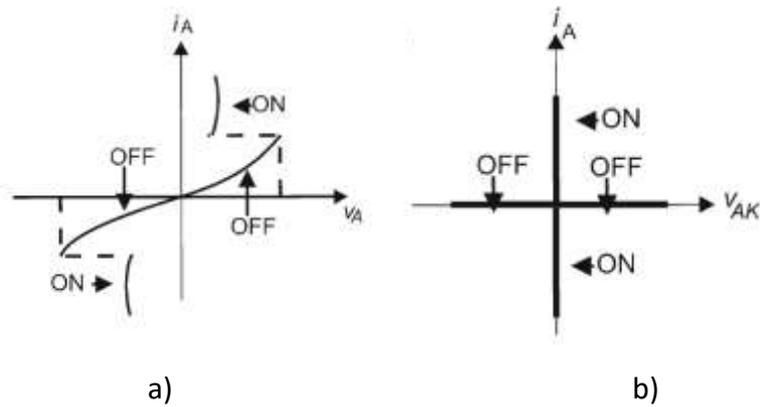


IMMAGINE 14: U-I CARATTERISTICHE DI TRIAC: A) REALE, B) IDEALE.

10.3.3 Interruttori completamente controllati

Negli interruttori completamente controllati, le modalità di apertura / chiusura possono essere attivate tramite il connettore di controllo. La breve descrizione di ciascun dispositivo è riportata nei seguenti punti.

Il transistor bipolare-BJT (transistor a giunzione bipolare) è un interruttore completamente controllato, in cui utilizziamo la base (B) per aprire l'interruttore, come mostrato nell'immagine 14 a). Nel transistor NPN, usiamo la tensione di base positiva per aprire il transistor. La corrente in esso va dal collettore (C) all'emettitore (E) e nella direzione inversa, il transistor non è conduttivo. Nel tipo PNP, l'apertura dei transistor è controllata con una tensione di base negativa in cui la corrente passa dall'emettitore al collettore.

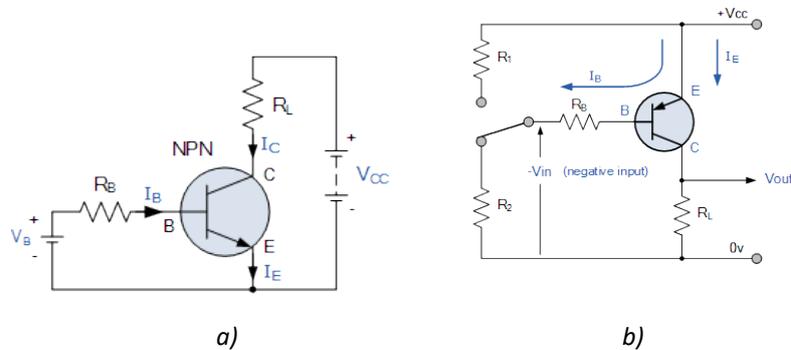


IMMAGINE 14: SIMBOLO DEL TRANSISTOR: A) TIPO NPN, B) TIPO PNP.

La struttura interna dei transistor è presentata nell'immagine 15.



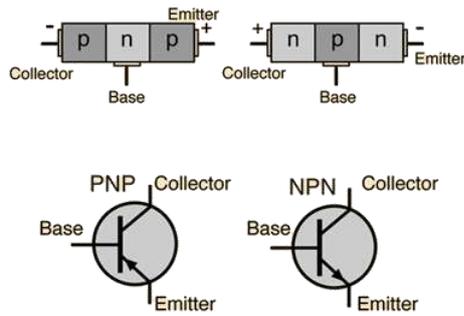


IMMAGINE 15: STRUTTURA DEL TRANSISTOR.

Dalla caratteristica statica del transistor NPN nell'immagine 16 a) è visibile che l'elemento ha tre campi di funzionamento. In due lavora come interruttore e nel terzo funziona come amplificatore lineare. L'interruttore viene chiuso quando il valore della corrente di base $I_B = 0$ e aperto quando la tensione tra il collettore e l'emettitore V_{CE} è inferiore a V_{CEsat} . Se osserviamo le caratteristiche ideali nell'immagine 15 b), significa che in modalità aperta il transistor tra C ed E perde corrente $I_C > 0$ a $V_{CE} = 0$. Per il trasferimento di potenze elevate, il transistor IGBT viene generalmente utilizzato al posto del transistor.

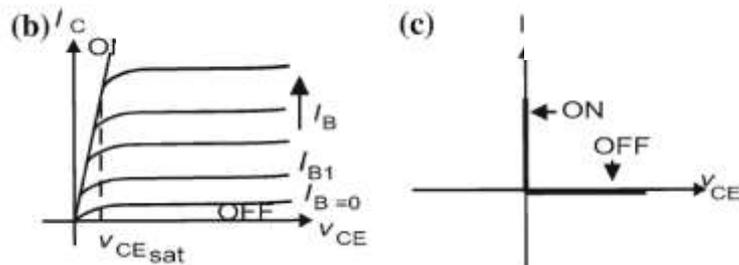


IMMAGINE 16: CARATTERISTICA STATICA DEL TRANSISTOR: A) REALE, B) IDEALE.

Transistor MOSFET. MOSFET (transistor ad effetto di campo a semiconduttore di ossidi metallici) è stato nominato dopo il principio di funzionamento, come mostrato nell'immagine 17. Analogamente come un transistor, ha tre connettori (G), (D) e (S).

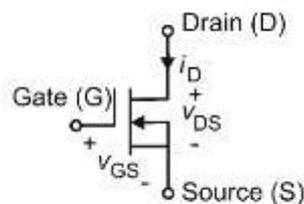


IMMAGINE 17: SIMBOLO DEL TRANSISTOR MOSFET.



L'apertura del canale è controllata attraverso un connettore (G), che utilizza il campo elettrico tra il substrato polarizzato inverso per il suo funzionamento. Il campo elettrico può essere gestito con tensione V_{GS} , che provoca l'apertura del canale tra il connettore (D) e (S). A causa di un sottile strato di biossido di silicio SiO_2 tra canale e porte, ha un'elevata resistenza di ingresso. A causa di questo RDS a bassissima resistenza durante la conduzione, è un elemento adatto per l'ingegneria energetica elettrica e il funzionamento a commutazione. L'apertura del canale di conduzione con il campo elettrico consente il trasferimento di correnti elevate. È anche importante notare che il transistor bipolare è un elemento controllato in corrente con corrente I_B . I transistor MOSFET sono elementi a tensione controllata con tensione V_{GS} . La caratteristica statica MOSFET è molto simile a un transistor bipolare, come mostrato nell'immagine 18.

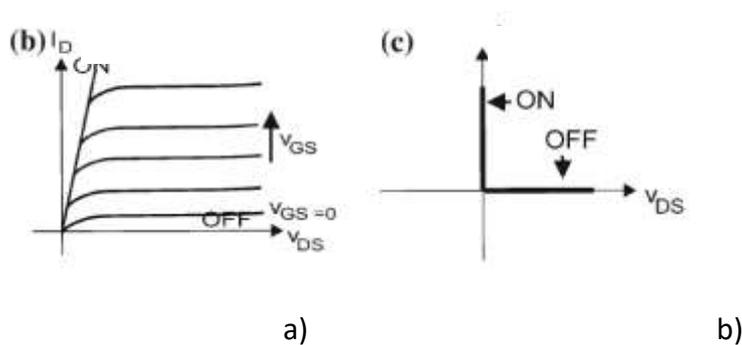


IMMAGINE 18: CARATTERISTICA STATICA DEL MOSFET: A) REALE, B) IDEALE.

Di seguito viene presentata la struttura del transistor MOSFET.

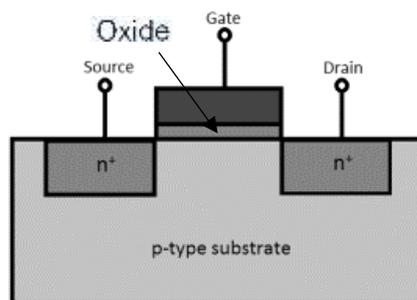


IMMAGINE 19: STRUTTURA DEL TRANSISTOR MOSFET.

Se confrontiamo le immagini 15 e 16, possiamo vedere che la struttura del MOSFET è significativamente diversa rispetto al transistor BJT. Nel MOSFET creiamo un canale di conduzione fornendo la tensione V_{GS} tra (G) e (D). La tensione V_{GS} crea un campo elettrico che crea un canale n+ conduttivo tra due substrati n+ incorporati all'interno del substrato p. Maggiore è la tensione, più ampio è il canale, il che significa che la resistenza del canale è inferiore. Nel funzionamento statico, usiamo le modalità completamente aperte o chiuse.



Lo svantaggio del MOSFET è la grande sensibilità di tensione sui gate di ingresso (G), che è il risultato di una grande resistenza di ingresso. A causa di ciò, è importante fare attenzione alle dimensioni della tensione VGD. Alcuni MOSFET hanno diodi di sicurezza integrati per questo motivo. Lo svantaggio MOSFET è anche una capacità relativamente elevata, che limita l'uso alle alte frequenze. Per questo motivo, ci sono state altre versioni che utilizzano due connettori (G). In questo modo, riduciamo meccanicamente la superficie del composto. Le buone caratteristiche del MOSFET sono dimensioni molto ridotte per grandi potenze, alta velocità di commutazione, resistenza ai carichi termici. La tabella 1 presenta la differenza tra transistor bipolare e MOSFET.

Proprietà	BJT	MOSFET
Resistenza di ingresso	Bassa	Alta
Controllo	Corrente (necessità di energia)	Tensione (nessuna energia)
Switching 'ON' time	50-500ns	5-500ns
Switching 'OFF' time	400-2400ns	5-500ns
Frequenza	80MHz	1.5GHz
Resistenza alla conducibilità	0.3Ω	0.01-1Ω
Sensibilità di sovraccarico	Pessima	Buona
Stabilità termica	Necessaria	Non necessaria

TABELLA 1: CONFRONTO TRA TRANSISTOR BIPOLARE E MOSFET.

Il transistor IGBT è ibrido tra transistor BJT e MOSFET. IGBT contiene buone caratteristiche del MOSFET, come la commutazione rapida e la resistenza a bassa conduttività del transistor BJT. L'IGBT è una connessione Darlington, composta da transistor MOSFET e BJT, come mostrato nell'immagine 20 a). MOSFET controlla la corrente di base nel transistor BJT.

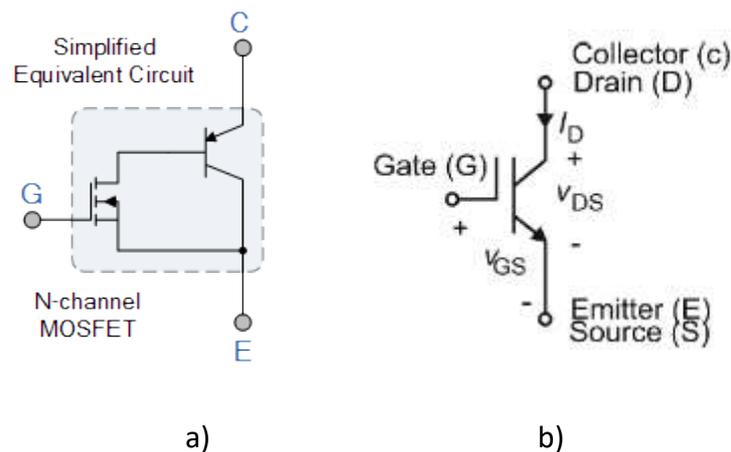


IMMAGINE 20: TRANSISTOR IGBT.



Il simbolo del transistor IGBT è costituito da transistor MOSFET e BJT. Il connettore di controllo (G) e il canale di conduzione (contrassegnati da (C) e (D)) sono visibili nell'immagine 20 b). La caratteristica statica è presentata nell'immagine 21.

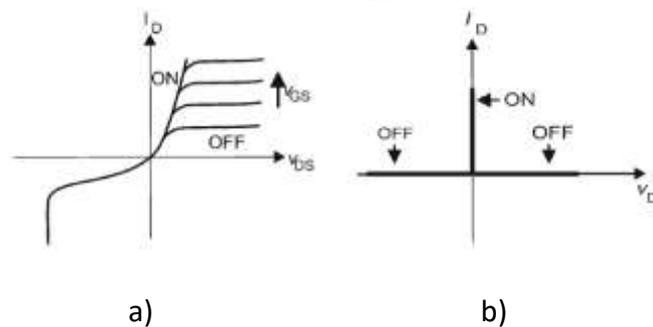


IMMAGINE 21: CARATTERISTICA STATICA DEL TRANSISTOR IGBT: A) REALE, B) IDEALE.

Il transistor IGBT è adatto per la commutazione a potenze più elevate. Rispetto al MOSFET, la tensione di controllo V_{GS} è leggermente superiore, ma le capacità di corrente sono significativamente più elevate come nel MOSFET. La tabella 2 presenta un confronto tra i transistor di potenza.

Proprietà		BJT	MOSFET	IGBT
Valutazione della tensione		Alta < 1kV	Alta < 1kV	Molto alta > 1kV
Valutazione della corrente		Alta < 500A	Bassa < 200A	Alta > 500A
Input drive		h_{FE} 20-200	3-10V	4-8V
Impedenza di ingresso	di	Bassa	Alta	Alta
Impedenza di uscita		Bassa	Media	Bassa
Velocità di commutazione	di	Lenta	Veloce	Media
Costo		Basso	Medio	Alto

TABELLA 2: CONFRONTO DEI TRANSISTOR BJT, MOSFET E IGBT.

Dai dati sopra, possiamo vedere che il transistor BJT è usato raramente per convertitori di potenza perché la potenza è facilmente sostituibile con transistor MOSFET. A correnti e tensioni molto elevate, è possibile utilizzare solo transistor IGBT.



10.4. Convertitori di commutazione

In questo capitolo presenteremo solo convertitori di commutazione. Questi forniscono alta efficienza e sono, quindi, dal punto di vista dell'ecodesign adatto per essere integrato nella maggior parte dei dispositivi elettronici moderni.

10.4.1 Convertitori di commutazione AC-DC - raddrizzatori

I convertitori AC-DC sono circuiti di alimentazione che convertono la tensione alternata in unidirezionale. I convertitori AD-DC fanno parte della maggior parte dei dispositivi elettronici. La ragione di ciò sono la loro efficienza e resa che sono entrambi molto importanti. Esistono diversi principi e altri approcci ai convertitori AC-DC. Il vantaggio del raddrizzatore AC-DC switch rispetto a quello ordinario è maggiore efficienza e dimensioni più piccole con le stesse potenze. Per motivi di ecodesign, presenteremo il principio per il convertitore di commutazione che è ampiamente utilizzato a causa dell'elevata resa in diversi dispositivi elettronici, come ricevitori televisivi, personal computer, dispositivi audio, ecc. L'immagine 22 presenta lo schema di raddrizzatore dello switch.

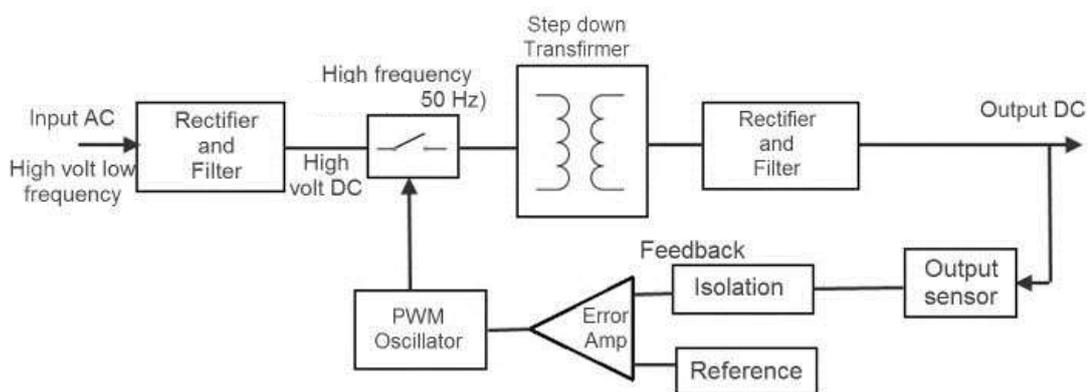


IMMAGINE 22: CONVERTITORI DI COMMUTAZIONE AC-DC.

Il convertitore AC-DC switch nel primo blocco indirizza istantaneamente la tensione di ingresso alternata con raddrizzatore a diodi a semionda o a onda intera. Molti convertitori AC-DC nella prima fase contengono filtri diversi per rimuovere rumore e bordi dalla rete. Nella seconda fase, la tensione viene portata attraverso un interruttore ad alta frequenza che viene controllato a seconda della tensione di uscita desiderata. La frequenza di commutazione è in genere compresa tra 10 e 100 kHz, a seconda del tipo di convertitore. Dall'interruttore, otteniamo un treno di impulsi che ha la stessa frequenza dell'interruttore. Il treno di impulsi viene portato al trasformatore, dove viene abbassata la tensione. Il trasformatore utilizzato contiene meno strati a livello primario e secondario, riducendo drasticamente le dimensioni e la quantità dei materiali utilizzati del trasformatore. Sull'uscita del trasformatore, è possibile utilizzare un filtro a bassa permeabilità per regolare la tensione o il convertitore di commutazione CC-CC. A



seconda della tensione a una via di uscita desiderata, controlliamo la velocità di commutazione.

L'immagine 23 presenta un convertitore AC-DC classico con trasformatore di ingresso. La dimensione del trasformatore dipende dalla potenza e dal rapporto di trasformazione della tensione alternata. In confronto al trasformatore in convertitore AC-DC, il rapporto di dimensione può essere anche 1:10 a favore del convertitore AC-DC.

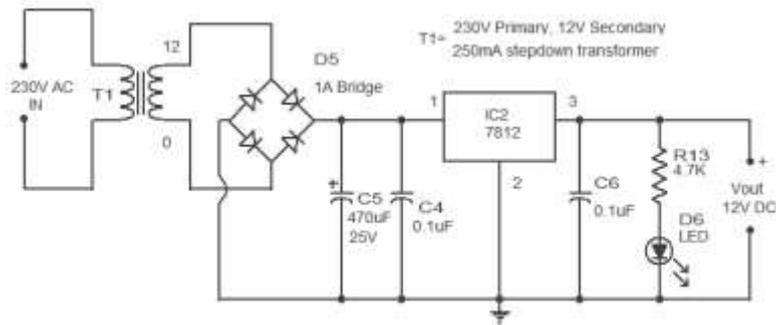


IMMAGINE 23: CONVERTITORE AC-DC CLASSICO

10.4.2 Convertitori di commutazione DC-DC

I convertitori DC-DC vengono utilizzati per fornire consumatori unidirezionali che possono essere trovati in molti dispositivi elettronici. I convertitori forniscono la regolazione della tensione unidirezionale su determinati consumatori. Sono anche usati per la separazione galvanica di un determinato circuito. Conosciamo quattro tipi di convertitori DC-DC:

- Convertitore step-down (convertitore buck)
- Convertitore step-up (convertitore boost)
- Convertitore step-down e step-up (convertitore Buck-Boost)
- **Convertitore Ćuk**

Il convertitore step-down, come suggerisce il nome, abbassa la tensione di ingresso CC. Lo schema di conversione step-down è presentato nell'immagine 24.

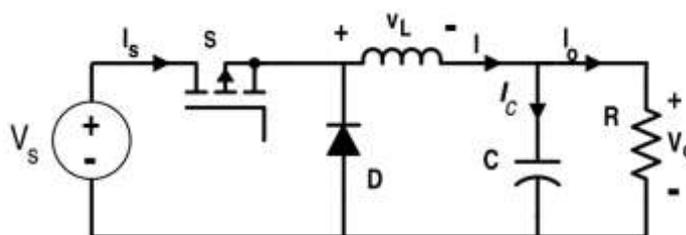


IMMAGINE 24: CONVERTITORE STEP-DOWN.



Il principio di funzionamento del convertitore è semplice; controlliamo l'interruttore portando la tensione di ingresso al circuito LC. Quando l'interruttore è chiuso, la corrente passa al circuito LC e alimenta il carico. Nel caso in cui l'interruttore non sia chiuso, il diodo stesso chiude il circuito secondario che è la conseguenza della propria induzione nella bobina. L'interruttore di solito è controllato dal segnale PWM. Il circuito LC è un setaccio a bassa frequenza che attenua le ondulazioni della tensione di uscita a causa della commutazione. Per interruttore controllato a seconda della potenza, possiamo utilizzare transistor BJT, MOSFET o IGBT. A seconda che l'interruttore sia aperto o chiuso, si ottiene un valore medio all'uscita del convertitore inferiore a V_{IN} . Con una progettazione e una scelta di elementi adatti, possiamo progettare un convertitore DC-DC altamente efficiente e affidabile. Molti produttori offrono convertitori DC-DC in un circuito integrato. Forma integrata significa che gli elementi chiave del convertitore sono tutti su un unico chip. A seconda delle proprie esigenze, è necessario scegliere bobina, tensione di uscita di riferimento e condensatore.

Il convertitore step-up viene utilizzato per i consumatori unidirezionali che richiedono una tensione superiore a quella connessa. Lo schema di conversione step-up è presentato nell'immagine 25.

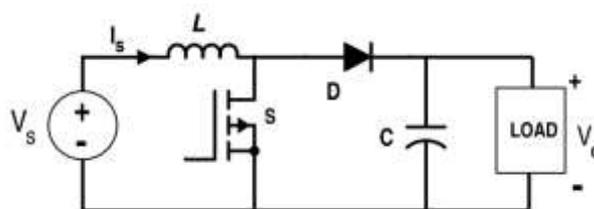


IMMAGINE 25: CONVERTITORE STEP-UP.

Il principio di funzionamento è basato sulla propria induzione della bobina di ingresso. Con la commutazione veloce, gli interruttori causano i bordi di tensione nella bobina L. Nel caso in cui l'interruttore sia concluso, la corrente passa attraverso la bobina di nuovo nell'alimentazione. In questa fase, causiamo l'induzione della bobina, il che significa che risparmiamo energia in L. Quando l'interruttore non è chiuso a causa della propria induzione, la bobina reindirizza l'energia risparmiata attraverso il diodo in un condensatore che funge da accumulo di energia nel cerchio secondario e levigante della tensione di uscita. La dimensione dei bordi di tensione dipende dalla velocità di commutazione. Più veloce è l'interruttore, il limite di tensione più alto è nella bobina L. In questo caso, controlliamo anche l'interruttore con segnale PWM in cui la velocità di commutazione è controllata dalla tensione di uscita. Il convertitore step-up può essere trovato in forma integrata, analogamente come un convertitore step-down.

Convertitore step-down / up. A seconda del connettore comune in un circuito elettronico, appare spesso la necessità di una tensione negativa sull'uscita del



convertitore. In questo caso, viene utilizzato step-down / up, come mostrato nell'immagine 26.

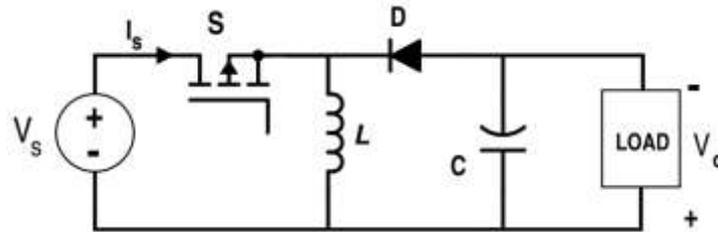


IMMAGINE 26: CONVERTITORE STEP-DOWN/UP.

Il convertitore step-down / up è costituito da un convertitore step-down e step-up del convertitore a cascata. Lo schema presentato mostra la realizzazione di entrambi i convertitori con un mezzo insieme di elementi. Il convertitore può generare una tensione inferiore o superiore a seconda del potenziale collegato. I principi di funzionamento sono i seguenti: quando l'interruttore è chiuso, la corrente passa attraverso la bobina L. Quando l'interruttore è aperto a causa della propria induzione della bobina L e del diodo polarizzato negativamente, la corrente va nella direzione opposta. Sul condensatore C si ottiene una tensione negativa, a seconda della tensione collegata. Il rapporto tra l'uscita e la tensione di ingresso è dato dal duty cycle del segnale PWM ($V_0 / V_s = D (1 / (1-D))$). Il segnale PWM può avere nell'esempio fornito +. Questo può avere un valore compreso tra 0 e 1 (0-100%).

Convertitore Ćuk prende il nome da Slobodan Ćuk, che è stato il primo a sviluppare tale circuito, come visto nell'immagine 27. Il convertitore Ćuk è fondamentalmente un convertitore step-down / up che può generare una tensione negativa in uscita. La differenza principale è che il condensatore e non la bobina sono responsabili del trasferimento di energia, rispetto agli esempi precedenti. Per il convertitore Ćuk è tipico che l'energia venga trasmessa in entrambe le modalità di commutazione (ON e OFF). Nel convertitore classico, l'energia viene trasmessa solo quando l'interruttore è in uno stato aperto o chiuso.

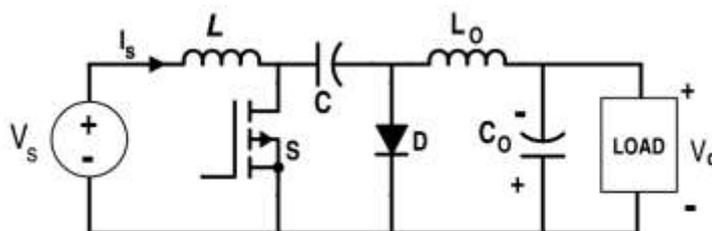


IMMAGINE 27: CONVERTITORE ĆUK.

10.4.3 Convertitori di commutazione DC-AC – Invertitori



I convertitori DC-AC sono circuiti di elettrotecnica che convertono l'uscita della sorgente di tensione unidirezionale, come batterie, celle solari o celle a combustibile in alternata tensione CA. Gli inverter vengono spesso utilizzati per la propulsione di motori elettrici o generatori di tensione. Gli inverter sono fondamentali nei sistemi di gruppi di continuità UPS. Gli inverter possono essere classificati in base alla potenza di uscita e al numero di fasi (monofase o trifase) e in base al tipo di conversione (semionda o onda intera). Nei convertitori DC-AC, conosciamo molti tipi e modalità di conversione, quindi presenteremo solo il convertitore monofase con un circuito a ponte, visto nell'immagine 28.

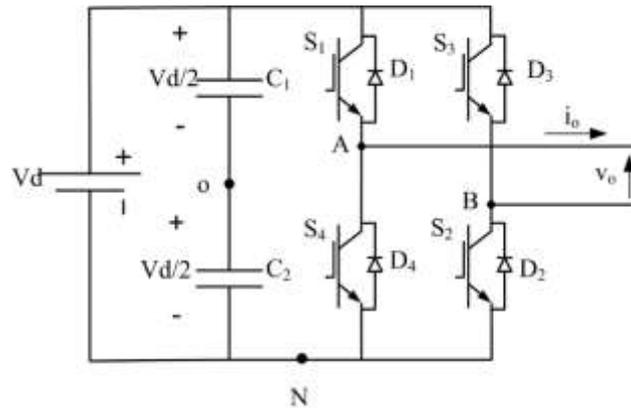


IMMAGINE 28: INVERTITORE MONOFASE CON CIRCUITO A PONTE.

Il principio di funzionamento del circuito è basato sul controllo elettronico degli interruttori S1-S4. Gli switch vengono commutati in diagonale S1S2 e S3S4, dove dobbiamo stare attenti a non chiudere S1S4 o S3S2. Con questo cambiamento, possiamo causare un cambio di direzione della corrente di uscita i_0 . Per il controllo dell'interruttore viene utilizzata la modulazione PWM, con la quale è possibile ottenere una tensione alternata relativamente regolare.

