

Portiamo a fusione i metalli con la tecnica ZVS, Zero Voltage Switching, applicata ad un circuito risonante RLC da 1.000 W.

RISCALDATORE A INDUZIONE 1.000W

di PIER ALESSANDRO AISA

Vi siete mai chiesti quanto possano essere intensi i campi elettromagnetici che ci circondano? La domanda sarebbe pertinente perché oggi attorno a noi abbiamo molti esempi che ci mostrano come siamo immersi in una miriade di onde

elettromagnetiche, dovute ad esempio ai cavi della distribuzione elettrica, ai ripetitori radio e TV, a quelli della rete telefonica radiomobile, ai radiocomandi. Basta avvicinare un telefono cellulare alla

cornetta del telefono fisso o ad un altoparlante e sentire "gracchiare", oppure passeggiare al buio sotto una linea di alta tensione con un neon e notare che si accende.

Queste onde invisibili per l'uomo in realtà sono molto presenti e anche invasive nella nostra vita quotidiana, sebbene il loro effetto divenga rilevante solo in alcuni casi e in funzione della potenza irradiata e della distanza alla quale ci troviamo. Ma quanto può essere potente un campo elettromagnetico? Il forno a microonde che in molti abbiamo in cucina dimostra che può scaldare i cibi e far scoccare archi

I nostri ispiratori



Michael Faraday (1791-1867) è stato un fisico e chimico britannico cui si deve la scoperta del fenomeno dell'Induzione elettromagnetica, nel 1831, che è attualmente alla base del funzionamento dei comuni motori elettrici, alternatori, generatori elettrici, trasformatori, altoparlanti magnetodinamici, testine fonografiche, microfoni dinamici, pick-up per chitarra magnetici, ecc. La scoperta avvenne quando avvolse due rotoli isolati di filo elettrico attorno ad un grande anello di acciaio, fissato ad un tavolo, e vide che facendo passare corrente attraverso un rotolo, una corrente momentanea era indotta nell'altro rotolo. Negli esperimenti successivi scoprì che, muovendo un magnete attraverso un coppia di filo, nel filo fluiva corrente elettrica. La corrente fluiva anche muovendo il solenoide sopra il magnete fermo. La Legge di Faraday-Neumann-Lenz divenne successivamente una delle quattro equazioni di Maxwell, che governano i campi elettromagnetici.

James Prescott Joule (1818-1889) è stato un fisico inglese che ha dato il nome a "l'effetto Joule". Nel 1848 studiando la natura del calore dimostrò la relazione tra la corrente che scorreva in una resistenza ed il calore dissipato, trovando che esisteva una proporzionalità tra la corrente che scorreva nel circuito e il calore prodotto.

Tale esperimento permise di ricavare l'equivalente meccanico della caloria con buona precisione e fornì le basi per la formulazione del Primo principio di termodinamica.



Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) è stato un fisico francese principalmente conosciuto per l'invenzione del "Pendolo di Foucault", ma a lui si deve anche la scoperta del fenomeno delle correnti parassite nel 1851 quando intuì che le correnti parassite sono causate dal movimento (o variazione) del campo magnetico che attraversa un conduttore ed il moto relativo genera la circolazione di elettroni, cioè di corrente all'interno del conduttore. Gli elettroni, muovendosi in vortici, generano a loro volta un campo magnetico in direzione opposta alla variazione del campo magnetico applicato per la legge di Lenz, quindi per effetto Joule si ha il riscaldamento del conduttore.



elettrici tra estremità di fogli di carta stagnola o oggetti in metallo inseriti per distrazione. Ma un campo elettromagnetico potrebbe essere così potente da portare un conduttore elettrico all'incandescenza in pochi secondi?

La risposta è sì e il progetto che presentiamo oggi fornisce una dimostrazione chiara di ciò. Si tratta infatti di un sistema che lavora sfruttando tre fenomeni fisici che noi elettronici dovremmo aver studiato a scuola: il principio dell'induzione magnetica, il principio delle correnti di Foucault e l'effetto Joule.

Il nostro progetto mostra come portare al riscaldamento ed eventualmente alla fusione materiali elettricamente conduttori e soprattutto ferromagnetici, tramite l'impiego di un circuito di tipo ZVS della potenza da 1.000 W nominali, che possono spingersi a 1.500 in determinate condizioni.

ZVS è l'acronimo di **Zero Voltage Switching**, che è una tecnica utilizzata nei convertitori elettronici di potenza per aumentare il rendimento, in quanto si fanno commutare i semiconduttori con tensione quasi nulla ai loro

capi e quindi il prodotto $V \times I$ si abbassa e, conseguentemente, le perdite in commutazione sono ridottissime, come descriveremo in maniera dettagliata più avanti nel paragrafo dedicato al principio di funzionamento.

Nel circuito verrà applicato lo stesso concetto che è alla base del funzionamento del piano di cottura a induzione, molto utilizzato all'estero nei Paesi dove l'energia elettrica è a buon mercato.

Il piano di cottura a induzione è costituito da una bobina in cui

viene fatta circolare un'elevata corrente elettrica alternata o comunque variabile nel tempo, la quale produce un campo magnetico, proporzionale alla corrente che lo genera. Per la **legge di Faraday**, una variazione del flusso del campo magnetico nel tempo produce una forza elettromotrice indotta in qualsiasi corpo elettricamente conduttore che viene investito dalle linee di forza che ne derivano. Questa forza elettromotrice dà luogo a correnti elettriche indotte che circolano nel materiale delle pentole o recipienti appoggiate sul fornello, chiamate **correnti parassite** o **correnti di Foucault** o **Eddy currents** ("Eddy" in inglese significa "vortice", per la caratteristica forma che assume la corrente all'interno del conduttore). Tali correnti parassite sono causa dell'**effetto Joule**, ovvero della produzione di calore a causa della perdita di energia loro conseguente. Nel caso della cucina a induzione, la dissipazione di energia sotto forma di calore provoca il riscaldamento della pentola, così come avviene in meccanica con l'attrito, che è una forza resistente la quale ha come conseguenza la dissipazione dell'energia cinetica sotto forma di calore.

Quello della cucina a induzione è comunque un caso particolare, perché l'effetto delle correnti indotte dai campi elettromagnetici differisce in base alla permeabilità magnetica dei materiali che vi sono immersi, alla loro riluttanza magnetica e alla conducibilità elettrica. Ciò spiega perché nel forno a microonde non possiamo metterci una pentola in metallo (ancor più in acciaio) ma cuociamo la carne, mentre su un piano di cottura a induzione la carne non può cuocere se non sta in una pentola con fondo in acciaio.

Infatti nel primo caso il calore si sviluppa nel cibo e nel secondo nel fondo della pentola, perché alcuni materiali scaldano sensibilmente già a basse frequenze e altri richiedono le microonde. Di solito l'effetto delle correnti parassite è da evitare, perché comporta perdite: si pensi ad esempio alle perdite nel nucleo dei trasformatori. Nel nostro caso, invece, lo andiamo ad esaltare per generare calore nel corpo investito dal campo magnetico; nello specifico, parliamo di materiali ferromagnetici, che già alle frequenze operative del circuito riscaldano fortemente. Oltre che per il riscaldamento e l'eventuale fusione dei metalli, il circuito può trovare altre possibili interessanti applicazioni, come ad esempio la trasmissione di energia nell'etere con l'uso di bobine accoppiate e sintonizzate alla frequenza di risonanza (wireless power) ed i circuiti di innesco per bobine di Tesla.

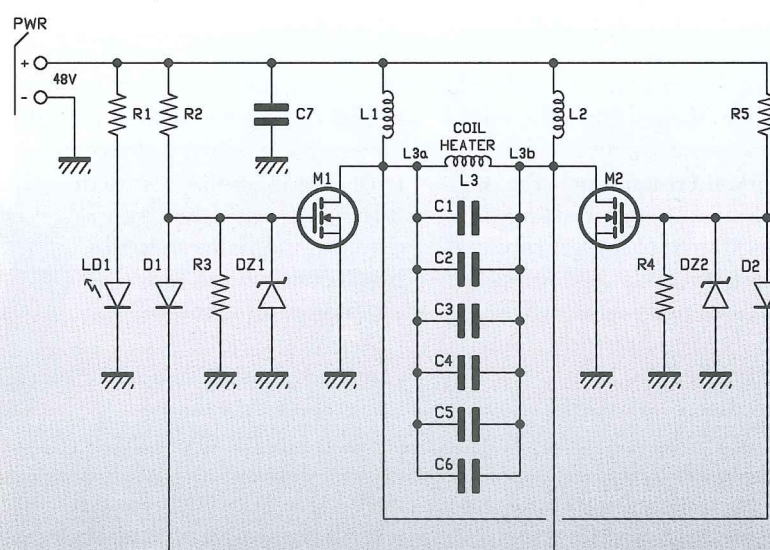
SCHEMA ELETTRICO

Osservando lo schema elettrico possiamo notare nel circuito di controllo una struttura simme-

trica a due rami, che va sotto il nome di oscillatore di Royer, ossia un circuito che permette l'autoscillazione di un blocco RLC alla sua frequenza di risonanza naturale.

Il blocco RLC è costituito per la parte L da una bobina comunemente chiamata "work-coil" o bobina di lavoro, per la parte C comunemente detto "tank-capacitor", da diversi condensatori posti in parallelo e per la parte R, dalle resistenze serie introdotte dai componenti e dai collegamenti. Una volta alimentato, l'oscillatore entra in risonanza e grazie alla elevata corrente di extra-risonanza che circola nel work-coil è in grado di creare un forte campo magnetico impresso. Quando l'oscillatore di Royer viene alimentato, per quanto sia simmetrico nei due rami, uno dei due MOSFET fra M1 e M2 entrerà in conduzione per primo, poiché i due MOSFET non saranno mai perfettamente uguali.

Supponiamo che entri in conduzione prima M1 e quindi il suo terminale di drain si porta a potenziale di massa e questo forza lo spegnimento di M2, grazie al

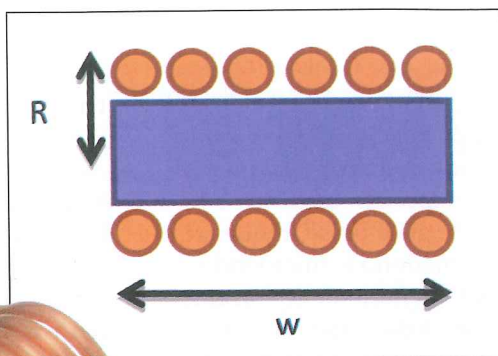


[schema ELETTRICO]



Fig. 1
La bobina è composta da spire distanziate di tubo di rame.

Fig. 2
La bobina ha un raggio R di 2,5 cm e una lunghezza w di 7cm.



diodo di feedback D1, che entra in conduzione ed estrae velocemente carica dal gate di M2. Il circuito risonante composto dall'induttore L3 e dai condensatori in parallelo C1, C2, C3, C4, C5, C6 fa vedere al drain di M2 una semionda sinusoidale che passa dal valore di zero al massimo e poi ritorna a zero; quando la semionda ritorna a zero si accende il diodo D2 che forza lo spegnimento di M1 e M2 si accende facendo generare al circuito risonante l'altra semionda sinusoidale. Da questo momento in poi il ciclo si ripete con la frequenza propria di risonanza del blocco RLC e sulla bobina L3 di work-coil avremo un'elevata corrente di forma sinusoidale alla frequenza di circa 100 kHz; tale valore, che produrrebbe un modesto riscaldamento nel cibo, in un bullone di ferro produce già un riscaldamento apprezzabile, che accresce con la disponibilità di una certa potenza elettrica e della conseguente induzione elettromagnetica. Nell'oscillatore, i MOSFET lavorano in controfase, ossia quando un M1 è acceso, M2 è spento e viceversa; questo è garantito dalla presenza del circuito risonante e dai diodi di feedback D1 e D2;

se si avesse una conduzione contemporanea dei due MOSFET, non ci sarebbe alcuna limitazione della corrente di cortocircuito e si verificherebbe la distruzione dei MOSFET per eccesso di corrente. La commutazione nei MOSFET avviene con una tensione fra i terminali di drain e source (V_{ds}) quasi nulla, ovvero in condizione di Zero Voltage Switching (da qui l'acronimo ZVS) e quindi la potenza dissipata in commutazione risulta minimizzata ed è pari a:

$$P_d = V_{ds} \times I_d$$

dove I_d è la corrente di drain. Inoltre, grazie alla tecnica ZVS, vengono molto ridotti i disturbi a radiofrequenza prodotti in commutazione, che il circuito irradia naturalmente nell'aria circostante.

I MOSFET M1, M2 sono degli IRFP260N della Infineon, caratterizzati da una bassissima $R_{ds(on)}$ (appena 40 mohm) e alta corrente di drain ($I_p=50A$); sono di tipo Fast Switching, ossia commutano dallo stato di piena conduzione (on) all'interdizione, molto velocemente e questo vale anche per i diodi integrati di protezione posti in antiparallelo, per i quali il parametro T_{RR} (tempo di Reverse Recovery, ossia di interdizione al verificarsi dell'inversione di polarità rispetto allo

stato di conduzione in polarizzazione diretta) deve essere dell'ordine dei 400 ns.

La massima tensione di picco che si verifica in un circuito a commutazione ZVS vale:

$$V_{PICCO} = V_{ALIMENTAZIONE} \times \pi$$

Avendo limitato a 48 Vcc la tensione di alimentazione, il parametro di massima tensione fra drain e source (V_{dss}) è stato scelto pari a 200V.

I diodi di retroazione D1 e D2 sono dei MUR420 e devono essere anch'essi di tipo Fast Switching, per spegnere in tempo il MOSFET a cui è collegato il loro anodo e portare una corrente di almeno 4A.

Per accendere i GATE dei due MOSFET sono presenti due resistenze di potenza R2 e R5 del valore di 470 ohm.

Per proteggere i MOSFET da extratensioni ed extracorrenti sono presenti due coppie diodi zener-resistenza R3/DZ1 e R4/DZ2. R3 e R4 hanno valore 10 kohm; DZ1 e DZ2 sono da 12V - 1W.

Il LED LD1 segnala la presenza dell'alimentazione ed è alimentato tramite il resistore in serie R1, da 4,7 kohm, che ne limita la

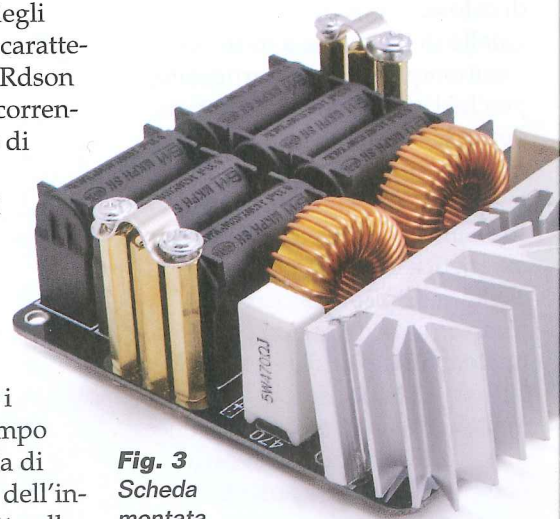


Fig. 3
Scheda montata.



Fig. 4
Colonnine di fissaggio
della bobina.

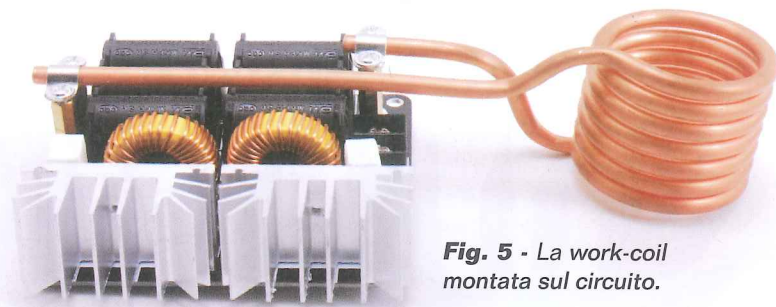


Fig. 5 - La work-coil
montata sul circuito.

corrente. Gli induttori L1 ed L2 hanno valore $100 \mu\text{H}$ e servono per limitare i picchi di tensione ("spikes") durante le commutazioni che potrebbero distruggere i MOSFET e sono avvolte su nuclei toroidali con una massima portata in corrente pari a 13A. I condensatori C1, C2, C3, C4, C5, C6 sono in polipropilene MKP per sopportare l'elevata corrente e tensione in risonanza e per limitare le perdite.

Nel nostro schema è stata selezionata una capacità di risonanza pari a circa $2 \mu\text{F}$ costituita dal parallelo di 6 condensatori da $0,33 \mu\text{F}$ e tensione di lavoro 630V.

La work-coil (Fig. 1) ossia la bobina dentro la quale introdurremo l'oggetto da scaldare/fondere, è realizzata con 6 spire di tubo di rame cavo di spessore 0,8 mm e diametro 6 mm avvolto in aria al fine di portare elevate correnti, dissipare bene il calore prodotto e minimizzare le perdite dovute all'effetto pelle che alla frequenza di 100 kHz tende a fare scorrere la corrente nella corona circolare del conduttore.

Le spire non devono toccarsi tra loro (perché il rame è nudo), altrimenti si creerebbe un cortocircuito tale da ridurre il numero e alterarne l'induttanza.

La work-coil ha un'induttanza teorica di circa $1,26 \mu\text{H}$, ma questa può variare a seconda della lunghezza dei rami orizzontali di collegamento ai condensatori. Per calcolare il valore teorico di autoinduttanza si può usare la formula (riferitevi alla Fig. 2):

$$L = \mu_0 N^2 \pi R^2 / w$$

dove μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto ($\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{H/m}$), N è il numero di spire componenti la bobina (nel nostro caso 6), R vale $2,5 \times 10^{-2} \text{m}$ e $w = 7 \times 10^{-2} \text{m}$, perciò L vale $1,26 \mu\text{H}$. Per calcolare il valore della frequenza di risonanza teorica si può usare la formula:

$$f_r = 1 / (2\pi * \sqrt{LC}) = 100,3 \text{ kHz}$$

dove $L = 1,26 \mu\text{H}$, $C = 2 \mu\text{F}$.

REALIZZAZIONE PRATICA

Per costruire ZVS Induction Heater è previsto un circuito stampato a doppia ramatura del quale sul nostro sito www.elettronica.in trovate le tracce lato rame. I componenti da montare sono pochi e gli unici che hanno orientamento sono diodi e MOSFET, da disporre come mostra il piano di montag-

gio in queste pagine e da dotare di dissipatori di calore (accoppiati con pasta al silicone) da 6°C/W ciascuno. A montaggio ultimato, la scheda priva della work-coil si presenterà come in Fig. 3. Per fissare la bobina sono previste tre colonnine esagonali dorate da 6 mm lunghe 40 mm per ciascun polo; alle due laterali si avvita (mediante viti 4MA) un collarino in ferro che stringerà le estremità della work-coil; allentare le viti di sostegno delle due torrette (Fig. 4), inserire i lati del work-coil all'interno del supporto metallico in modo che l'avvolgimento del work-coil sia rivolto dal lato del morsetto di ingresso alimentazione, contrassegnato con + / -. Posizionare il work-coil in modo da lasciare meno di 1 cm di tubo in sporgenza dal supporto a torrette e stringere le viti (Fig. 5).

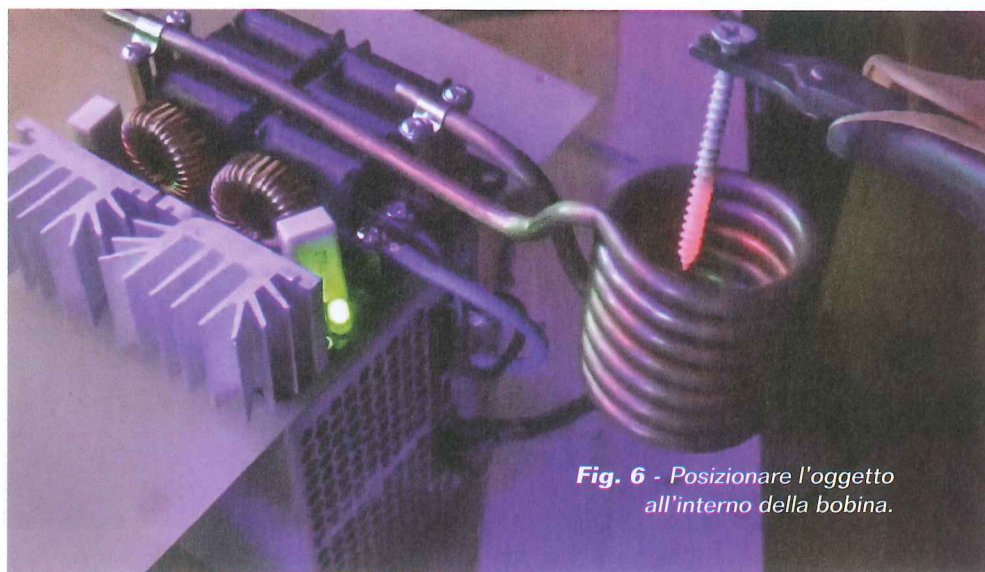
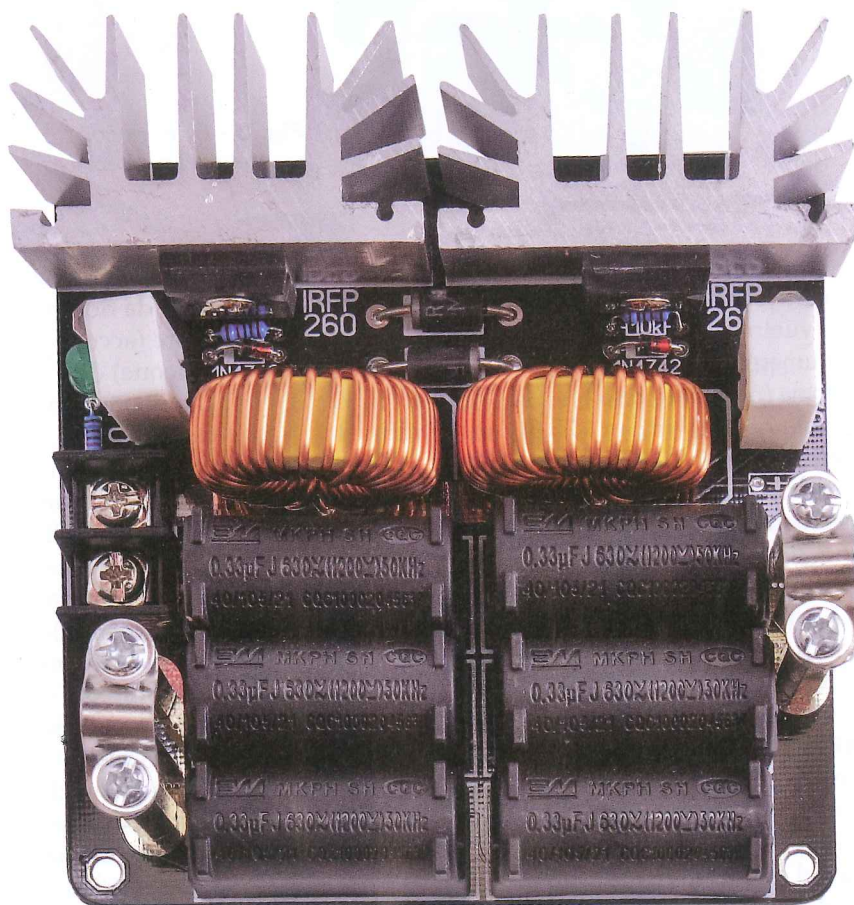


Fig. 6 - Posizionare l'oggetto
all'interno della bobina.

[piano di MONTAGGIO]



Elenco Componenti:

- C1: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C2: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C3: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C4: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C5: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C6: 0,33 μ F 630 V~ passo 30mm
- C7: -
- R1: 4,7 kohm
- R2: 470 ohm 5W
- R3: 10 kohm 1%
- R4: 10 kohm 1%
- R5: 470 ohm 5W
- L1: Bobina 100 μ H
- L2: Bobina 100 μ H
- L3: Bobina 1,26 μ H
- M1, M2: IRFP260N
- D1: MUR420
- D2: MUR420
- DZ1, DZ2: 1N4742
- DL1: LED 5 mm verde

Varie:

- Morsetto 2 vie 10 mm
- Vite 20 mm 3 MA (2 pz.)
- Vite 10 mm 4 MA (10 pz.)
- Torretta F/F 30 mm 4 MA (6 pz.)
- Dissipatore (2 pz.)
- Collare tubo 6 mm (2 pz.)
- Circuito stampato (101x101mm)

UTILIZZO

Il circuito deve essere alimentato con una tensione in continua

compresa fra 10 e 48 V e con una sufficiente potenza; se si applica la massima tensione prevista, di

48 Vcc, consigliamo un alimentatore con potenza non inferiore a 1.500 W. Inserite i fili positivo e negativo dell'alimentatore nel morsetto verificando opportunamente la polarità della tensione e stringete le viti. Alimentate il circuito fra i terminali + e - e verificate che si accenda il LED verde LD1 ad indicare la presenza della tensione in ingresso. A questo punto all'interno del work-coil circola la corrente di risonanza a circa 100 kHz. Se si alimenta con il massimo della tensione prevista (48 Vcc) e senza introdurre corpi metallici all'interno de work-coil, l'assorbimento di potenza è inferiore a 500 W; invece introducendo un conduttore, a seconda del materiale da cui è composto, della dimensione,

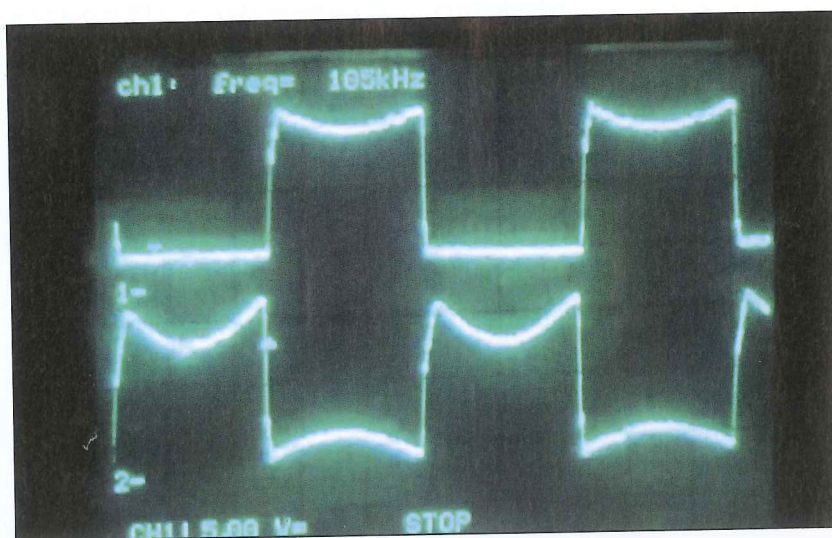


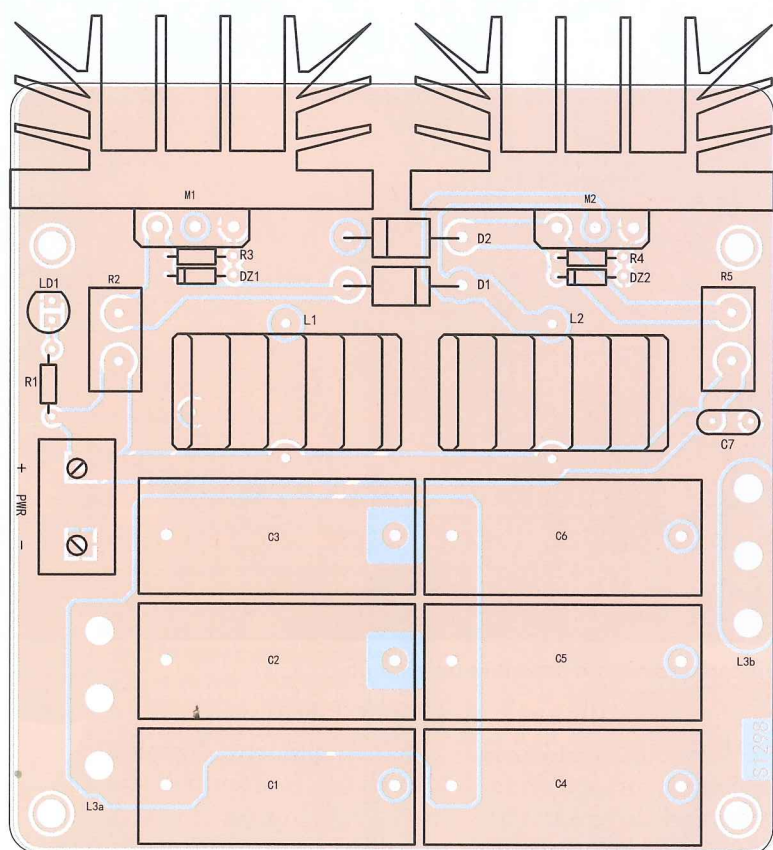
Fig. 7 - Forma d'onda sui gate dei due MOSFET.



Precauzioni nell'uso

Il dispositivo offre esperienze interessanti e utili funzionalità ma va utilizzato con attenzione.

- Assicurarsi che non ci siano nelle vicinanze sostanze infiammabili, perché il sistema sviluppa forte calore sui suoi elementi e sui conduttori introdotti all'interno del work-coil.
- Assicurarsi che non ci siano nelle vicinanze dispositivi elettronici, come ad esempio elettromedicali. ZVS Induction Heater produce un campo magnetico elevato di circa 10mT alla frequenza di 100 kHz che potrebbe disturbare dispositivi elettronici (vedi paragrafo misure).
- Utilizzare sempre delle pinze con il manico isolato per maneggiare i conduttori introdotti all'interno della work-coil, per evitare ustioni.
- Non toccare i componenti di ZVS Induction Heater e i conduttori introdotti nel work-coil, dopo o durante il funzionamento, per evitare ustioni.



della geometria e della posizione assunta, la potenza assorbita può variare molto fino ad un massimo di 1.500 W.

Selezionato il corpo conduttore da introdurre nella work-coil, come ad esempio una vite metallica, afferratelo e mantenetelo in posizione con una pinza (che non deve avvicinarsi troppo alle spire) per evitare di ustionarvi. Inserire lentamente il conduttore all'interno del work-coil, cercando di non farlo toccare con le pareti dell'avvolgimento. Mantenere il conduttore in posizione verticale all'interno del work-coil. Il conduttore introdotto costituisce il secondario del trasformatore che ha come avvolgimento di primario il work-coil e trovandosi all'interno di un solenoide,

il materiale conduttore viene investito dalle linee di campo magnetico in modo più intenso

rispetto a posizioni al di fuori del solenoide. In poco tempo il materiale inserito a causa dell'effetto Joule si riscalda e cambia colore assumendo le tinte tipiche dell'incandescenza arancione-giallo (Fig. 6).

Questa condizione può essere mantenuta per qualche decina di secondi, ma dovete considerare

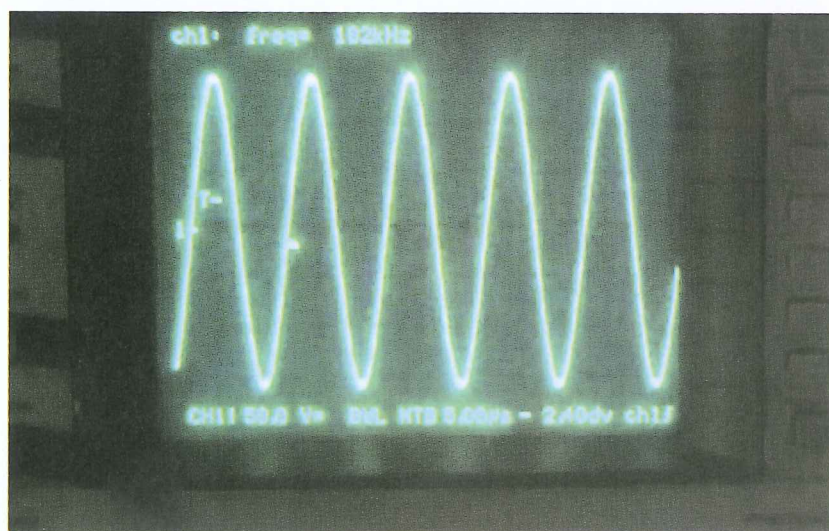


Fig. 8 - Forma d'onda ai capi della work-coil.

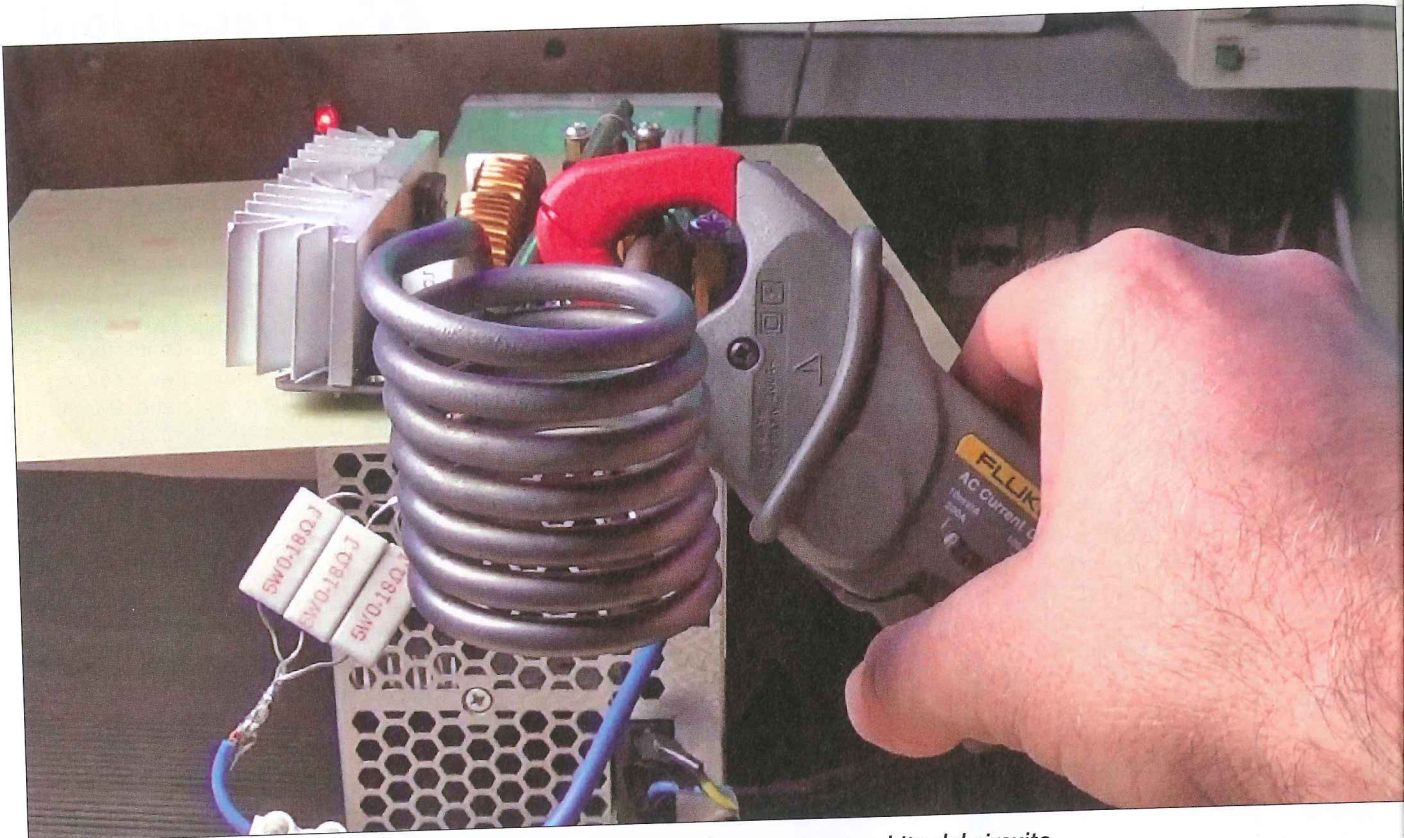


Fig. 9 - Shunt per verificare la corrente assorbita dal circuito.

che la temperatura si eleva molto e quindi bisogna porre particolare attenzione a non entrare in contatto diretto col conduttore o il work-coil o i dissipatori per evitare ustioni.

Facciamo notare che dopo qualche minuto di utilizzo dello ZVS Induction Heater l'avvolgimento di work-coil tenderà a scurirsi, fino a diventare quasi nero per il calore generato, ma questo non ne precluderà il funzionamento.

MISURE

La corrente che circola all'interno del work-coil presenta un valore RMS di circa 100A. Con una corrente così elevata, il campo magnetico è notevole e quindi tutti gli oggetti nelle vicinanze vengono investiti dalle linee di forza, per cui anche eventuali dispositivi sensibili ai campi magnetici potrebbero essere disturbati. L'induzione magnetica B si può calcolare con la formula:

$$B = \mu_0 N I / L = 10,7\text{mT} = 107 \text{ gauss}$$

dove $N = 6$, $I = 100\text{A}$, $L = 1,26 \mu\text{H}$. La Fig. 8 mostra le forme d'onda all'oscilloscopio delle tensioni fra i terminali di GATE-SOURCE di M1 e M2, che come si può notare sono perfettamente in controfase: prima che la tensione di GATE di M2 assuma livello alto e si accenda completamente M2, la tensione dell'altro GATE M1 è già a livello basso garantendo M1 spento ed evitando la conduzione contemporanea dei due MOSFET, che provocherebbe la distruzione dei MOSFET.

La Fig. 8 mostra la tensione applicata al work-coil, che raggiunge livelli ragguardevoli pari a circa 150V di picco e mantiene una forma perfettamente sinusoidale grazie al circuito risonante parallelo RLC.

Infine, la Fig. 9 mostra l'assorbimento in corrente del circuito in corrispondenza di una tensione di ingresso di 48 Vcc, che è pari a 17A.

La misura è effettuata sulla base della caduta di tensione rilevata

con un multimetro digitale ai capi di una resistenza di shunt pari a 0,06 ohm (ottenuta con il parallelo di tre resistenze da 0,18 ohm) e con un oggetto inserito nel work-coil.

Concludiamo augurandovi buon lavoro e ricordandovi ancora una volta che, se prestate la massima attenzione nell'uso, il circuito potrà riservarvi esperienze suggestive e soddisfacenti. ■



per il MATERIALE

Il riscaldatore ad induzione 1000W (cod. ZVS1000) è in vendita presso Futura Elettronica al prezzo di Euro 67,00. Il prezzo si intende IVA compresa.

Il materiale va richiesto a:
Futura Elettronica, Via Adige 11,
21013 Gallarate (VA)
Tel: 0331-799775 - Fax: 0331-792287
<http://www.futurashop.it>