

Induttori di potenza

Introduzione

Quando attraverso un conduttore fluiscono elettroni, attorno ad esso si genera un campo magnetico e questo fenomeno si chiama elettromagnetismo. Il campo magnetico agisce sull'orientamento degli elettroni all'interno degli atomi provocando tra gli atomi la comparsa di una forza fisica e può agire a distanza sulla materia attraverso lo spazio vuoto. Il **campo** magnetico può essere misurato in due modi: la sua **forza** o la concentrazione che ha a una certa distanza (simbolo f.m.m. = forza magnetomotrice e unità amperspire) e il suo **flusso** che è la quantità totale di campo nello spazio (simbolo Φ e unità Weber). Il valore del flusso di campo magnetico che viene generato nello spazio è proporzionale al valore della forza di campo applicata.

Il flusso del campo magnetico fa affidamento su un certo valore di inerzia per accumularsi negli elettroni che fluiscono nel conduttore che genera il campo e gli induttori sono progettati per trarre vantaggio da tale fenomeno. In altre parole il campo magnetico che circonda un induttore si espande quando la corrente che scorre in esso aumenta e collassa quando la corrente diminuisce ma a causa dell'energia cinetica degli elettroni in movimento ciò da luogo ad un'azione di accumulo. Questo comportamento può essere altrimenti descritto come una opposizione al flusso di corrente, che agisce come un carico quando la corrente aumenta e come un generatore quando la corrente diminuisce.



La capacità di un induttore di accumulare energia sotto forma di campo magnetico è chiamata **induttanza** le cui unità di misura sono gli Henry (H). Gli induttori vengono comunemente chiamati **reattanze induttive** o più semplicemente **induttanze** e nelle applicazioni ad alta potenza vengono talvolta chiamati **reattori**.

Dando forma di bobina all'induttanza si fa in modo che si generi un campo magnetico di più forte intensità e l'introduzione di un nucleo solido costituito da particolari materiali può far aumentare ulteriormente l'intensità del campo magnetico. Altri fattori che influenzano il valore dell'induttanza sono il numero di spire dell'avvolgimento (maggiore è il numero di spire, maggiore è il valore di induttanza) e

la permeabilità del materiale del nucleo. **Permeabilità** (simbolo μ e unità tesla x metri / amperspire) è un termine utilizzato per descrivere l'attitudine di un materiale a lasciarsi magnetizzare. Un nucleo in aria ha permeabilità uguale a uno mentre un nucleo di ferro dolce ha permeabilità uguale a 600 (ambidue i valori sono approssimati).

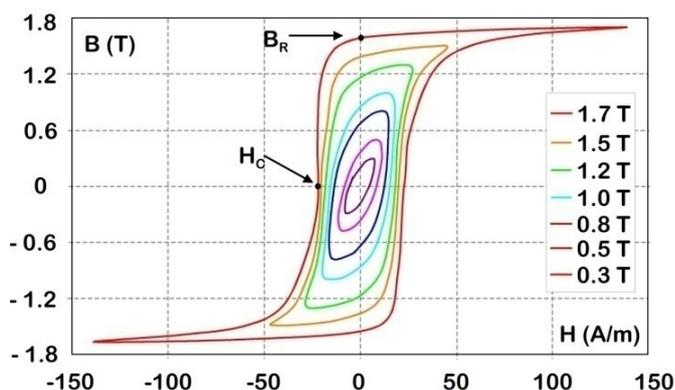
L'**intensità di campo magnetico** è una misura della forza del campo magnetico (f.m.m.) distribuita sulla lunghezza di un elettromagnete (simbolo H e unità amperspire / metri) e talvolta ci si riferisce ad essa con il nome di forza magnetizzante. L'intensità di campo magnetico determina la densità di flusso magnetico (simbolo B e unità tesla). H viene ottenuta conoscendo la f.m.m. e dividendola per la lunghezza del materiale mentre B viene ottenuta dividendo il flusso totale (Φ) per la sezione trasversale del materiale. Riportando in un grafico l'andamento di B in funzione di H è possibile ottenere una curva di magnetizzazione normale (o curva B-H) per ogni specifico materiale. Ci sono due importanti caratteristiche che vengono messe in luce dalla curva: quando l'intensità di campo prima aumenta e poi diminuisce (oppure viceversa), la curva cambia forma e mostra un **isteresi** e quando ci si avvicina alla massima intensità di campo la curva tende ad appiattirsi perché più il flusso si affolla nella sezione trasversale meno elettroni rimangono che sono in grado di essere allineati. Ci si riferisce a questo appiattimento con il nome di **saturazione**.

I progettisti di induttori cercano di minimizzare questo effetto selezionando un nucleo tale per cui la densità di flusso non si avvicini mai ai livelli di saturazione e l'induttore lavori in una porzione lineare della curva B-H.

Particolarità costruttive

Materiali per nuclei

Il presente documento tratta di induttori di potenza e i nuclei prevalentemente utilizzati da REO vengono fabbricati da tagli di lamiere magnetiche in acciaio al silicio a grani orientati. L'orientamento degli atomi volutamente creato dal processo di laminazione dell'acciaio, fornisce proprietà magnetiche di qualità molto elevata e perdite AC molto basse nella direzione di laminazione. Inoltre l'alto contenuto di silicio aiuta a ridurre le perdite perché favorisce proprietà desiderate quali la coercitività (l'intensità del campo magnetico che è necessario applicare ad un materiale per annullare la sua magnetizzazione) e la permeabilità a bassi valori di flusso. Il silicio inoltre stabilizza meccanicamente l'acciaio e lo preserva dall'invecchiamento.

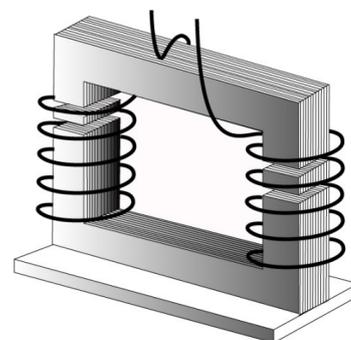


Il diagramma mostra una famiglia di cicli B-H misurati con una densità di flusso che è modulata con una sinusoide a 50 Hz con ampiezza che varia da 0,3T a 1,7T. Il materiale è acciaio a grani orientati convenzionale. B_R denota l'induzione residua e H_C è il campo coercitivo. I cicli B-H si chiamano anche cicli di isteresi. Densità di flusso maggiori di 1,8T non vengono utilizzate perché i nuclei con densità così elevate incontrerebbero facilmente la saturazione. Per un valore di induttanza costante viene scelta una densità di flusso tra 1,3T e 1,4T.

I nuclei vengono costruiti con lamierini (tagli di lamiera) di spessore da 0,1 mm a 1 mm al fine di ridurre le correnti parassite. Tanto maggiore è la frequenza, tanto minore è lo spessore scelto. REO utilizza la miglior qualità di acciaio elettrico (magnetico) ad alto rendimento, laminato a freddo e a grani orientati, tipo M4, M5 o M6 che ha un contenuto di silicio compreso tra il 2,8% e il 3,5 % con una permeabilità pari a ca. 15000 e una densità di flusso di esercizio massima raccomandata di 17 kilogauss. Ciononostante il campo di frequenza è limitato al massimo a 18 kHz e al di sopra questo valore devono essere utilizzati nuclei amorfi o in ferrite. Il valore della corrente è il fattore più importante da tenere in considerazione quando si progettano gli induttori perché sia le correnti parassite sia le perdite per isteresi aumentano al quadrato all'aumentare della corrente.

La presenza nel nucleo di traferri (intercapedini) aumenta il valore della resistenza al flusso magnetico e consente agli induttori di essere utilizzati con correnti più elevate senza andare in saturazione. E' importante stabilire dove questi traferri vengono posizionati e idealmente dovrebbero trovarsi all'interno degli avvolgimenti per ridurre i campi di dispersione. E' meglio avere più traferri piccoli che uno solo grande, perché anche così si riducono i flussi dispersi.

Nelle reattanze induttive per DC link, possono essere utilizzati blocchi in ferrite in aggiunta ai traferri, per fornire un valore costante di induttanza a prescindere dalle variazioni di carico.



Nuclei in aria

In aggiunta alle caratteristiche di leggerezza e compattezza gli induttori avvolti in aria offrono molti altri benefici oltre alla protezione contro i corto circuiti e al livellamento. Gli induttori avvolti in aria hanno il vantaggio di conservare il loro valore di induttanza anche in condizioni che porterebbero alla saturazione. La forma costruttiva toroidale presenta inoltre campi di dispersione di valore molto piccolo e quindi genera emissioni irradiate di debolissima intensità. Gli induttori avvolti in aria possono anche essere utilizzati nei sistemi a recupero di energia come reattanze induttive di accoppiamento per il livellamento della corrente, dove il raffreddamento efficiente e il peso sono considerazioni importanti.



Avvolgimenti

Il conduttore utilizzato per gli avvolgimenti è in genere costituito da rame pieno dotato di un rivestimento isolante come lo smalto, eccetto che per le applicazioni ad alta frequenza (vedi dopo). Il diametro del conduttore viene scelto in base alla capacità di trasportare la corrente richiesta.

Numero e sezione trasversale delle spire e sezione trasversale del nucleo determinano la densità di flusso. Tuttavia, più avvolgimenti vi sono, maggiore è il flusso disperso. Quindi la densità di flusso ottimale viene ottenuta come miglior compromesso tra numero di spire dell'avvolgimento, materiale del nucleo, peso totale, costo dei materiali e ambiente elettromagnetico. Gli avvolgimenti possono aver forma di solenoidi o toroidi.

Protezione contro la penetrazione di solidi e liquidi

Il processo finale di produzione dopo aver costruito un induttore è l'impregnazione sotto vuoto del complesso nucleo-avvolgimento al fine di evitare che durante il funzionamento possa generarsi rumore acustico causato dalle forze magnetiche e per fornire robustezza meccanica.

Possono essere utilizzati differenti metodi di protezione a seconda dei requisiti delle applicazioni. Una soluzione è quella di incapsulare completamente il componente utilizzando una resina poliesteri che può fornire una tenuta conforme al grado di protezione IP 65. Racchiudendo i terminali elettrici in una scatola con buona classe di ermeticità, REO può offrire induttori che non richiedono contenitori aggiuntivi anche quando vengono utilizzati in condizioni di polvere e umidità.



Raffreddamento

A causa del tipo di costruzione e dei principali materiali utilizzati (rame e ferro) gli induttori di potenza sono piuttosto grandi e pesanti. È importante assicurare che il raffreddamento sia molto efficiente in modo tale da poter dissipare il calore generato dall'isteresi e dalle perdite nel ferro (perdite nel nucleo). Ciò si ottiene lasciando spazi tra i differenti strati di avvolgimento (cosa che inoltre aumenta le distanze superficiali).

Per gli induttori di maggior dimensioni destinati alle applicazioni ferroviarie, una tecnica largamente utilizzata da REO è quella di avere, quando sia disponibile una ventilazione naturale favorita dal moto di avanzamento del treno, una serie di avvolgimenti ravvicinati, dal nucleo verso l'esterno, distanziati fra loro. Elementi distanziatori attentamente posizionati tra gli avvolgimenti, vengono utilizzati per dirigere il flusso d'aria dal basso verso l'alto nell'induttore. Non solo si migliora notevolmente la ventilazione ma il campo elettromagnetico prodotto dall'induttore energizzato ha l'asse che è ad angolo retto con i binari e così il campo non crea interferenze con i sensori dei binari utilizzati per il segnalamento ferroviario.

Raffreddamento ad acqua

Una sensibile riduzione delle dimensioni può essere ottenuta utilizzando il raffreddamento forzato ad aria per mezzo di ventole di raffreddamento o meglio ancora il raffreddamento ad acqua, un metodo che REO ha perfezionato per l'utilizzo con una molteplicità di componenti di propria costruzione.

La figura mostra una reattanza induttiva di linea con raffreddamento ad acqua che viene utilizzata con gli inverter a frequenza variabile al fine di ridurre le armoniche, i buchi di commutazione e per fornire protezione contro i transitori elettrici di corrente e di tensione.



Impregnazione sotto vuoto e rivestimento al silicio

Un maggior isolamento elettrico tra le parti sottoposte a tensione e le altre superfici metalliche viene ottenuto con l'impregnazione sotto vuoto con vernice, dopo l'assemblaggio finale dell'induttore. Questo processo aiuta anche a ridurre il rumore acustico e i movimenti meccanici causati dalla magnetizzazione e demagnetizzazione delle bobine avvolte e dei lamierini del nucleo.



Aumentata resistenza meccanica e protezione contro i danni causati dall'accumulo di sporcizia o dalla collisione con oggetti solidi vengono fornite grazie a un rivestimento al silicio aggiuntivo.

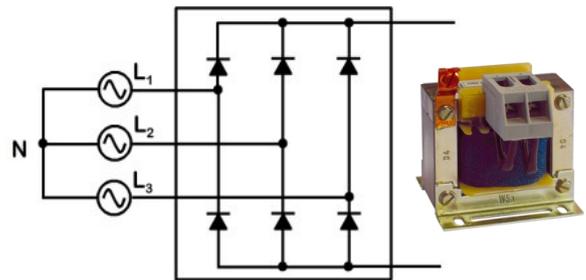


Applicazioni con gli induttori

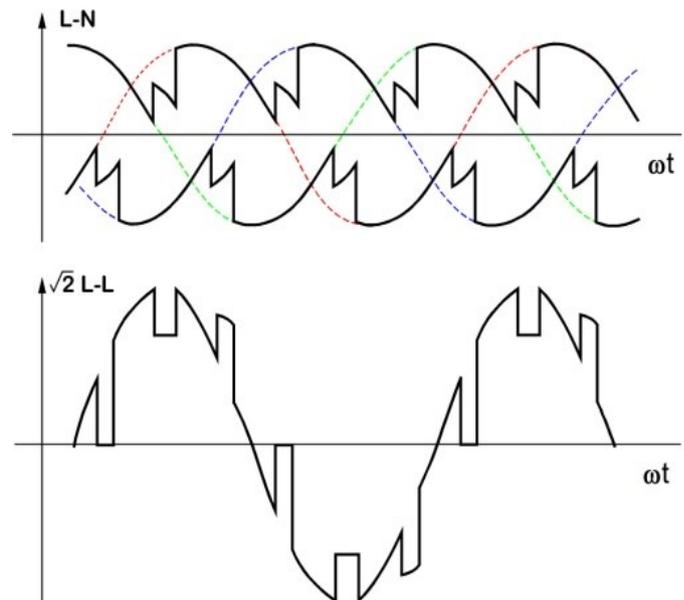
Reattanze di commutazione

Nei circuiti con rettificatori controllati al silicio, come quello mostrato in figura, non appena una fase viene aperta e un'altra viene chiusa (commutazione), per un brevissimo periodo di tempo si ha un corto circuito fra due fasi. Ciò provoca un rapido innalzamento del valore della corrente e un abbassamento del valore della tensione verso zero.

Reattanze di commutazione possono essere inserite nei circuiti di alimentazione per proteggere i semiconduttori limitando le correnti di corto circuito.



Un'altra conseguenza della commutazione è che possono comparire buchi di tensione (notches) nella tensione di alimentazione e questi possono assumere forme diverse. Possono a volte passare per lo zero e ciò può creare problemi ai sistemi di controllo che utilizzano il passaggio per lo zero come riferimento per il tempo. Le reattanze di commutazione non sono progettate per proteggere il sistema di alimentazione e l'ampiezza dei buchi di tensione dipenderà dall'impedenza del sistema di alimentazione. Per ridurre l'ampiezza dei buchi di tensione lato ingresso alimentazione, è necessario utilizzare una reattanza di linea (vedi dopo) collegata in serie.

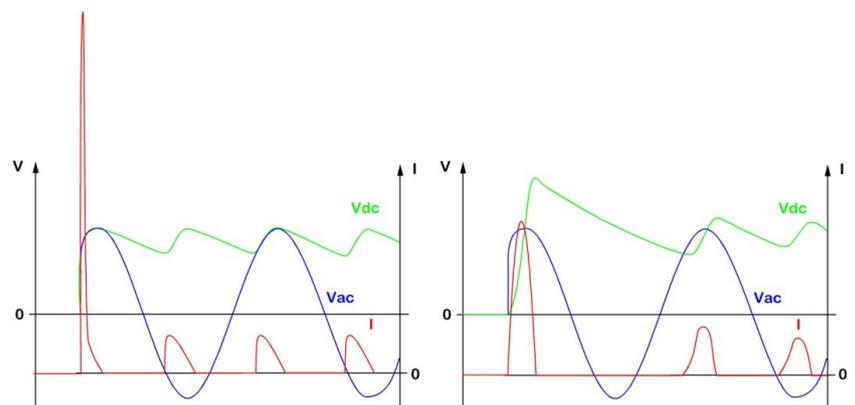


Protezione dei condensatori e dei rettificatori

La maggior parte degli alimentatori switching hanno un circuito intermedio (DC link) che contiene condensatori di livellamento tra lo stadio del convertitore e dell'inverter.

Questi vengono scaricati quando l'alimentatore viene spento. In presenza di microinterruzioni della tensione di rete i condensatori tendono a scaricarsi mentre cercano di sostenere il valore della tensione di uscita. Quando i condensatori si ricaricano vi è un elevato picco di corrente istantanea che può sollecitare in modo eccessivo i condensatori e i rettificatori del convertitore.

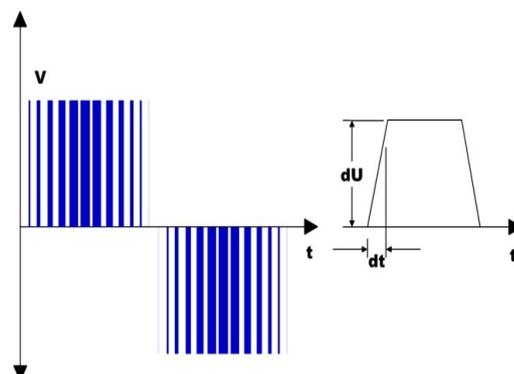
Il diagramma a sinistra mostra come nel circuito per alcune decine di microsecondi il picco di corrente di alimentazione sia molto più elevato di quello nel diagramma a destra che risulta dalle misure effettuate sullo stesso circuito in cui all'ingresso è stata inserita una reattanza di linea come impedenza aggiuntiva.



Induttanze dV/dT

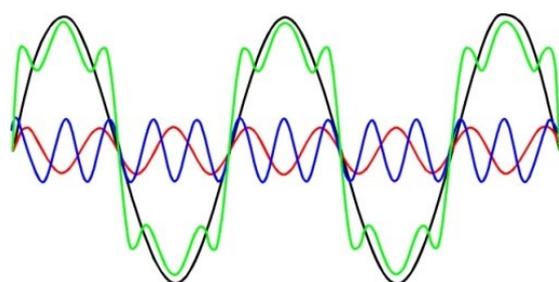
Nei circuiti a rapida commutazione che utilizzano semi-conduttori, come quelli nei convertitori e negli inverter a frequenza variabile, la salita di tensione è molto rapida e può assumere valori anche maggiori di $12\text{kV}/\mu\text{s}$. Ciò può sollecitare in modo eccessivo l'isolamento dei motori e portare a guasti prematuri. Una induttanza limitatrice dei gradienti di tensione dV/dT all'uscita dell'inverter può ridurre la velocità di salita della tensione a $500\text{V}/\mu\text{s}$ e può quindi proteggere il motore. Per percorsi cavi più lunghi tra l'inverter e il motore, una induttanza di uscita lato motore è richiesta per ridurre gli inaccettabili picchi di tensione elevati, oltretutto anch'essi a forte pendenza

dV/dT , causati dalle riflessioni di tensione nei cavi.



Armoniche

Ogni commutazione non lineare nella rete di alimentazione AC può essere analizzata e si scoprirà che è costituita da un gran numero di frequenze armoniche, alcune predominanti e alcune non dipendenti dalla natura del circuito e dei componenti assieme collegati. Il problema con le armoniche è che esse non apportano alcuna energia utile. Sono indesiderate perché distorcono la forma d'onda della sinusoide fondamentale che i gestori della rete sono obbligati a mantenere in buono stato e inoltre prelevano in modo eccessivo correnti causate dal *displacement power factor* e dalla combinazione degli *harmonic power factors*.



Ci sono vari modi per ridurre le armoniche e **REO INDUCTIVE COMPONENTS AG** si è specializzata nelle soluzioni passive che utilizzano induttori. Un metodo è quello di inserire una reattanza induttiva di linea sul lato di alimentazione di ogni apparecchiatura elettronica che potrebbe star generando armoniche. In questo caso la soluzione è detta essere applicata alla sorgente. Come alternativa può essere inserito un filtro centrale, più grande, per attenuare le armoniche ma ciò limita la flessibilità quando viene aggiunta una qualunque apparecchiatura al circuito. A volte, per motivi di costo, piuttosto che ridurre tutte le armoniche si preferisce ridurre ad un livello accettabile il valore della distorsione armonica totale (THD). In questo caso viene utilizzato un filtro progettato per reagire a determinate frequenze armoniche selezionate, che creano il valore più elevato di distorsione armonica. Questo filtro è costituito dalla combinazione di induttanze e capacità. Con gli inverter a frequenza variabile un'altra tecnica utilizzabile è quella di inserire una reattanza induttiva per circuiti intermedi in serie a una linea del DC link.



Le reattanze induttive di linea fabbricate da REO sono progettate per bloccare tutte le armoniche e per consentire alla frequenza fondamentale di passare. Ciò si ottiene perché l'impedenza induttiva cresce con l'aumentare della frequenza. Tanto maggiore è il valore dell'induttanza, tanto maggiore è il valore della tensione di corto circuito (la differenza in tensione tra un induttore con carico e senza carico) e tanto più elevato è il livello di attenuazione delle armoniche che viene raggiunto. L'impedenza di ingresso (U_K) di una reattanza induttiva di linea viene espressa come caduta di tensione percentuale e normalmente un induttore ha un valore pari al 2% o al 4% ma altri valori possono essere utilizzati a seconda delle circostanze.



Disturbi di modo comune

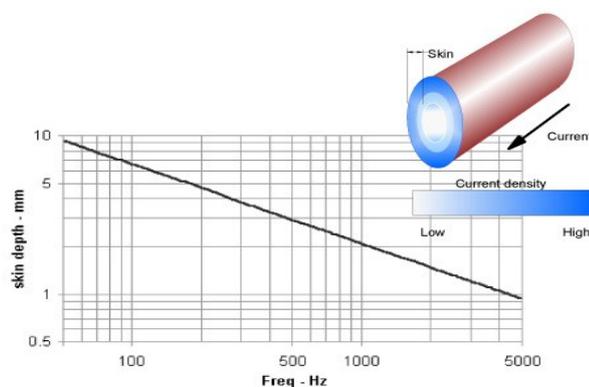
REO INDUCTIVE COMPONENTS AG ha una lunga esperienza nella progettazione di componenti speciali che devono funzionare in ambienti diversi.

L'ingegneria ferroviaria richiede che tutti i componenti debbano essere il più possibile leggeri e compatti, che debbano resistere a condizioni ambientali estreme, che debbano sopportare carichi per urti e vibrazioni, che debbano essere protetti contro la penetrazione di acqua e ci si aspetta che forniscano un funzionamento affidabile per un periodo di tempo pari almeno a vent'anni. La figura mostra un tipico esempio di induttanza REO-Nieke avvolta in aria per la soppressione di disturbi RF di modo comune in un alimentatore per servizi ausiliari di bordo di una locomotiva.

Frequenze più elevate

A frequenze più elevate (maggiori di 18 kHz) l'utilizzo di acciaio elettrico per la costruzione dei nuclei non è più possibile agli effetti pratici perché all'aumentare della frequenza deve essere ridotta la densità di flusso magnetico e l'unico modo per farlo è quello di usare una maggior quantità di materiale per il nucleo. Nonostante la densità di flusso ridotta, gli effetti del riscaldamento causati dalle maggiori perdite risultano di solito inaccettabili. E' tuttavia possibile utilizzare nuclei costituiti da materiali amorfi che possono lavorare a frequenze più elevate con livelli di flusso normali e questi vengono costruiti con nastri nano cristallini che vengono avvolti a forma di toroide. I nuclei amorfi vengono magnetizzati con facilità, hanno basse perdite per isteresi, elevata resistività e piccole perdite per correnti parassite.

A causa della tendenza della corrente di scorrere nella sezione più esterna del conduttore (un fenomeno noto come effetto pelle) neppure gli avvolgimenti tradizionali sono adatti per la costruzione di induttori che debbano lavorare a frequenze più elevate. Una soluzione è quella di utilizzare un conduttore chiamato filo litz (dal tedesco *Litzendraht*, filo intrecciato) al posto del normale filo di rame. Il filo litz è costituito da numerosi fili ricoperti individualmente con materiale isolante e intrecciati fra loro.



Unità produttive

REO Inductive Components AG



Area assemblaggio componenti induttivi a Hennigsdorf
per induttori di potenza con correnti fino a 2000A



Impianto a Kyritz, Brandenburg, per la
produzione di induttori di potenza con cor-
renti fino a 160A