

## Lezione 07

# Sorgenti di Interferenza Condotta

Stefano Selleri

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze



## Sommario della Lezione

- ❖ Introduzione
- ❖ Disturbi Condotti
- ❖ Misurazione dei disturbi generati
- ❖ Line Impedance Stabilization Network
- ❖ Alimentatori

## Introduzione

Abbiamo già diviso i disturbi in *condotti* e *radiati*. Le sorgenti di interferenza possono essere suddivise in modo analogo.

Il disturbo *condotto* è legato a delle correnti o tensioni di disturbo veicolate dai cavi di connessione dell'apparato. La classe principale di questi disturbi è quella legata ai cavi di alimentazione, per cui la fonte principale di disturbi condotti è la rete elettrica.

Il disturbo *radiato* è invece legato a campi elettromagnetici che inducono correnti e tensioni di disturbo sulle parti non appropriatamente schermate del dispositivo.

È intuitivo come gli spettri di queste due classi di disturbi siano diversi.

## Disturbi condotti

I disturbi condotti sulla rete elettrica a 50Hz hanno uno spettro che va da poche frazioni di Hz, per le fluttuazioni di tensione osservabili ad occhio nudo, a circa 1GHz per transitori e spike.

Questi ultimi potrebbero produrre componenti spettrali superiori al GHz ma la natura dei cavi, le perdite, le capacità e le induttanze parassite su di essi, attenuano rapidamente tali componenti.

- ❖ *Stazionari* – ovvero disturbi che persistono per periodi più lunghi del periodo di osservazione;
- ❖ *Quasi stazionari* – disturbi che, nel periodo di osservazione, compaiono e scompaiono per lunghi periodi di tempo;
- ❖ *Transitori* – disturbi la cui durata è molto minore del periodo di osservazione.

## Disturbi condotti

Sono esempi di disturbi *Stazionari*:

- ❖ *Segnali di radiodiffusione* (radio, TV etc) captati dalla rete e condotti agli utilizzatori.
- ❖ *Aumenti e diminuzioni intenzionali dell'alimentazione*, si hanno quando, in previsione di un periodo di maggior consumo, nelle ore di punta, si aumenta intenzionalmente l'alimentazione per compensare il maggior assorbimento, ovvero quando, in caso di crisi della rete di alimentazione, si diminuisce intenzionalmente il voltaggio.

## Disturbi condotti

Sono esempi di disturbi *Quasi Stazionari*:

- ❖ *Segnali di comunicazione mobile* (cellulari, etc.) captati dalla rete e condotti agli utilizzatori.
- ❖ *Apparecchiature industriali*, motori, convertitori etc. possono reiniettare nella rete disturbi sempre presenti per il periodo di accensione dell'apparato (che sono quindi stazionari se l'apparato è sempre acceso o quasi stazionari se l'apparato viene acceso per brevi periodi)
- ❖ *Apparecchiature domestiche*, lavatrici, lavastoviglie, microonde etc.

## Disturbi condotti

Sono esempi di disturbi *Transitori*:

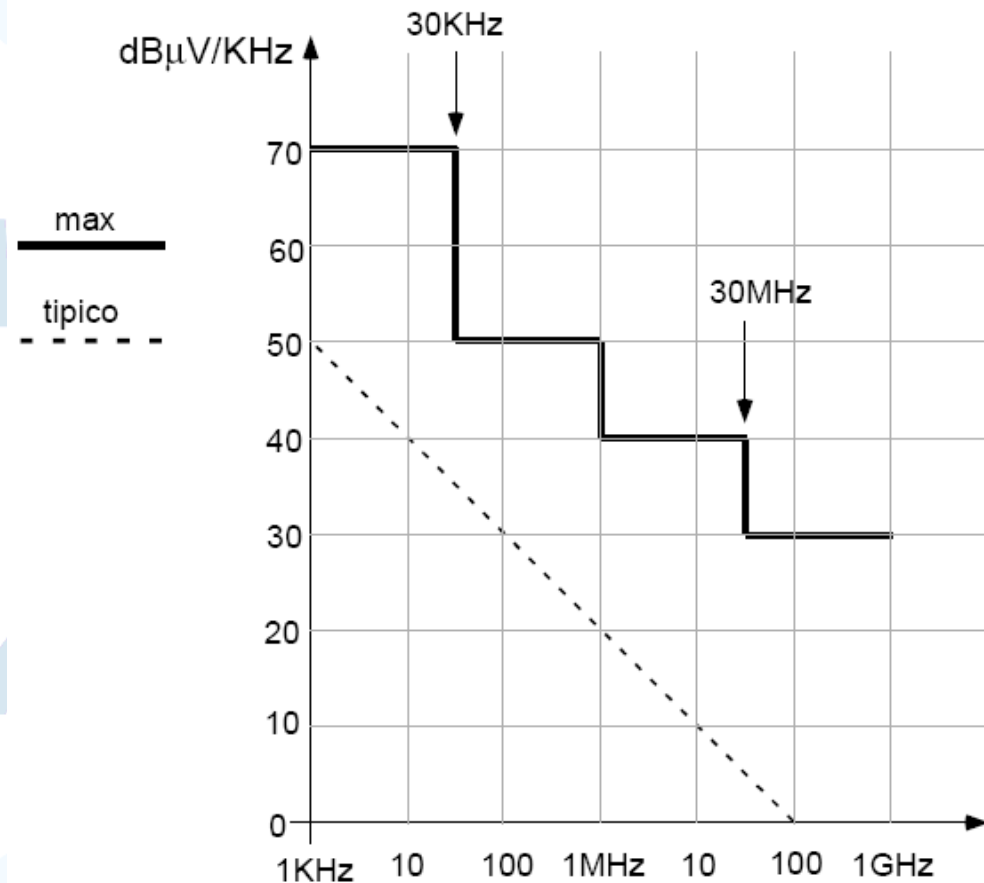
- ❖ *Accensione o spegnimento di grossi carichi* che iniettano grosse correnti di terra.
- ❖ *Transitori captati dalla rete*, fulmini che colpiscono la rete o cadono vicino e vengono captati, altri tipi di disturbi radiati captati dalla rete.

## Disturbi condotti

### Maschera spettrale dei disturbi Stazionari e Quasi stazionari:

La presenza di opportuni accorgimenti per le apparecchiature domestiche ed industriali fa sì che i disturbi stazionari e quasi stazionari siano essenzialmente legati alle comunicazioni fisse e mobili captate dalla rete. Di conseguenza il loro livello è strettamente legato all'affollamento dell'etere.

Nella figura a lato si riporta il livello di densità spettrale che si ottiene misurando la tensione presente sulla rete interponendo un filtro che cancelli la componente a 50Hz.



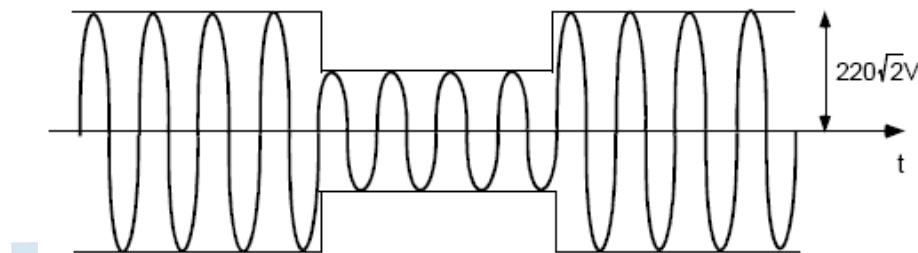


## Disturbi condotti

### Disturbi transitori:

La connessione di un grosso carico causa un assorbimento di corrente che genera un abbassamento della tensione nella rete. Questo abbassamento permane fino a che i dispositivi di regolazione delle centrali non intervengono.

L'abbassamento di tensione transitorio così generato, in cui la tensione assume un valore efficace minore di 220V, è detto **SAG**

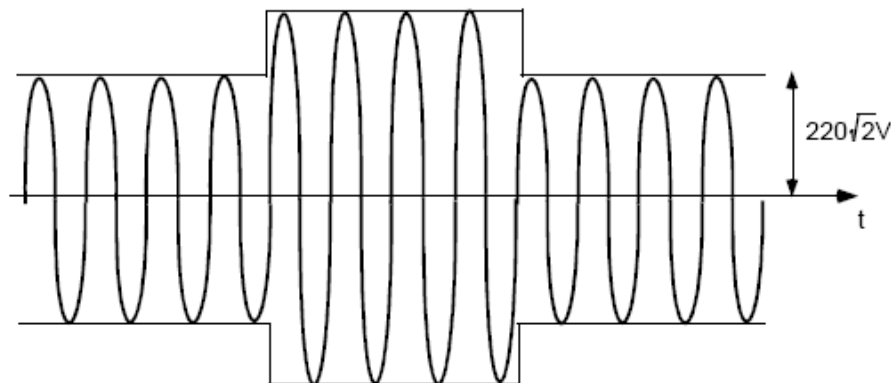


## Disturbi condotti

### Disturbi transitori:

Viceversa la sconnessione di un grosso carico causa la brusca diminuzione della corrente assorbita e quindi un innalzamento della tensione che perdura fino a quando i dispositivi di regolazione non intervengono.

L'innalzamento di tensione transitorio così generato, in cui la tensione assume un valore efficace maggiore di 220V, è detto ***SURGE***



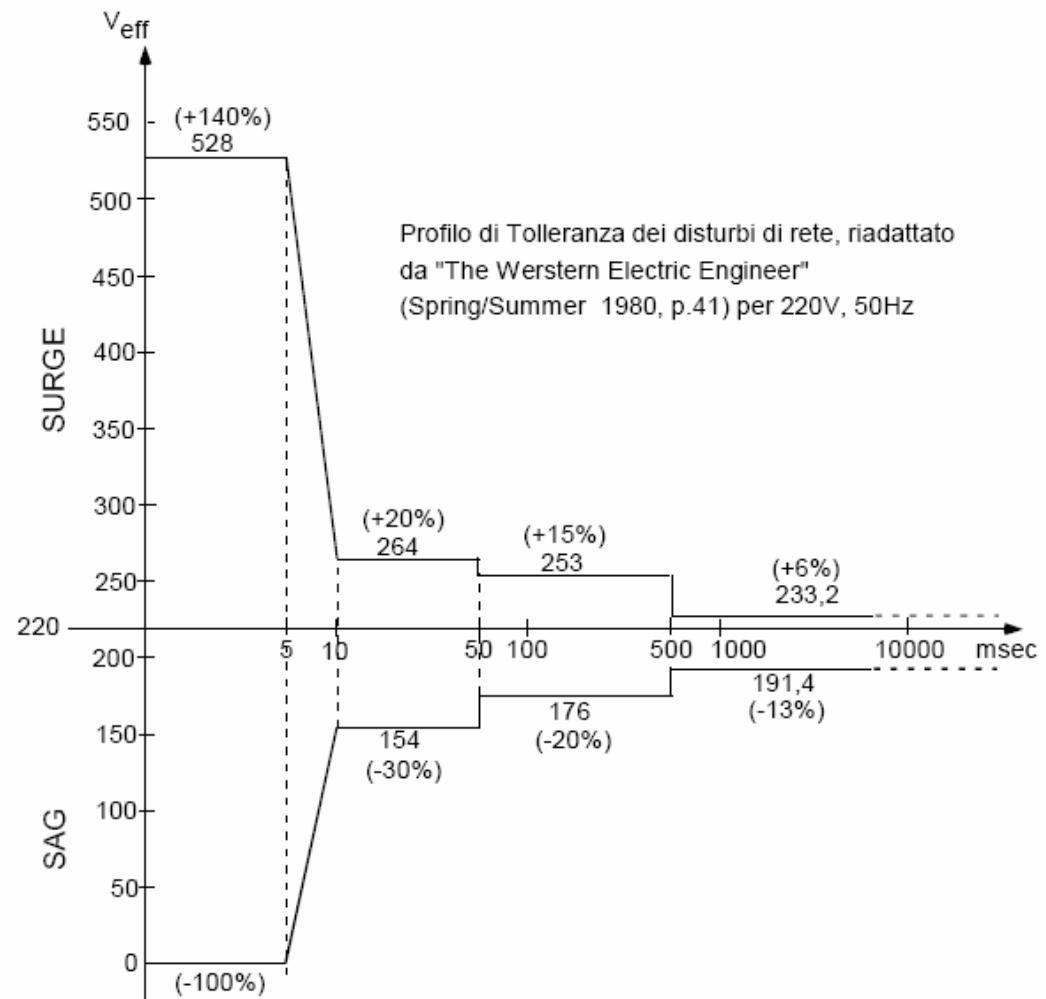
Si noti esplicitamente come sia i sag sia i surge siano disturbi transitori in cui la frequenza della rete resta comunque pari a 50Hz

## Disturbi condotti

### Disturbi transitori:

I transitori devono rientrare entro determinati limiti di tolleranza.

Questi limiti hanno ampiezze funzioni dei tempi di durata dei transitori medesimi, come risulta dalla maschera a lato.



## Disturbi condotti

### Disturbi transitori:

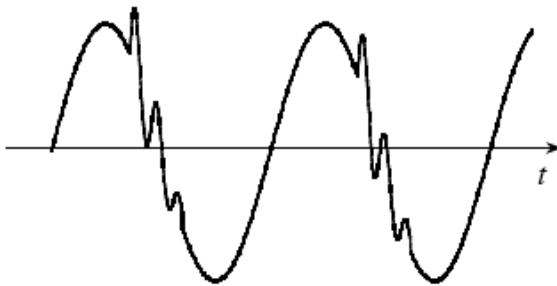
Mentre i sag e i surge sono disturbi transitori alla frequenza di 50Hz i disturbi transitori con spettro più ampio sono le *oscillazioni smorzate* e gli *spike*.

- ❖ L'*oscillazione smorzata* occupa tipicamente la porzione dello spettro compresa tra 400 e 5000 Hz. Le oscillazioni smorzate sono prevalentemente legate alle manovre di ricostruzione della rete in caso di avaria, là dove c'è bisogno di disconnettere e riconnettere tratti di linea.
- ❖ Lo *spike* invece occupa tipicamente la porzione dello spettro che va da 10 a 100kHz. Gli spike sono prevalentemente legati ai fulmini captati dalla rete di distribuzione

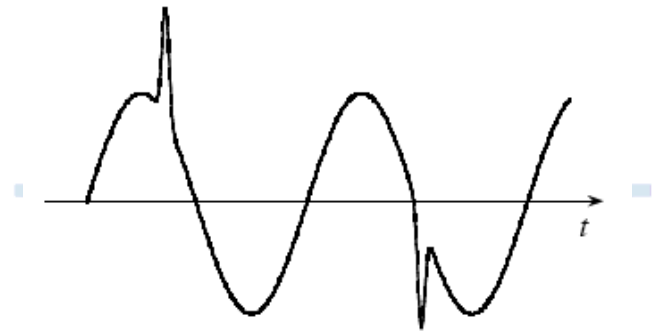
Un'indagine statistica ha calcolato che vi sono in media, mensilmente, 128 di questi fenomeni, equamente distribuiti: 50% di oscillazioni smorzate, 50% si spike

## Disturbi condotti

*Oscillazione smorzata.*



*Spike*



Le vittime principali dei transitori sono i circuiti digitali che, lavorando con basse tensioni, possono facilmente incorrere in un errore di simbolo a causa dei transitori.

Per ovviare a questo problema può essere necessario interporre un filtro tra l'alimentazione di rete e l'alimentazione del dispositivo.

## Disturbi condotti

Come sempre in EMC il problema dei disturbi, in questo caso condotti, ha due facce, un dispositivo deve essere robusto per funzionare in presenza di disturbi ma deve anche essere progettato per non generarne.

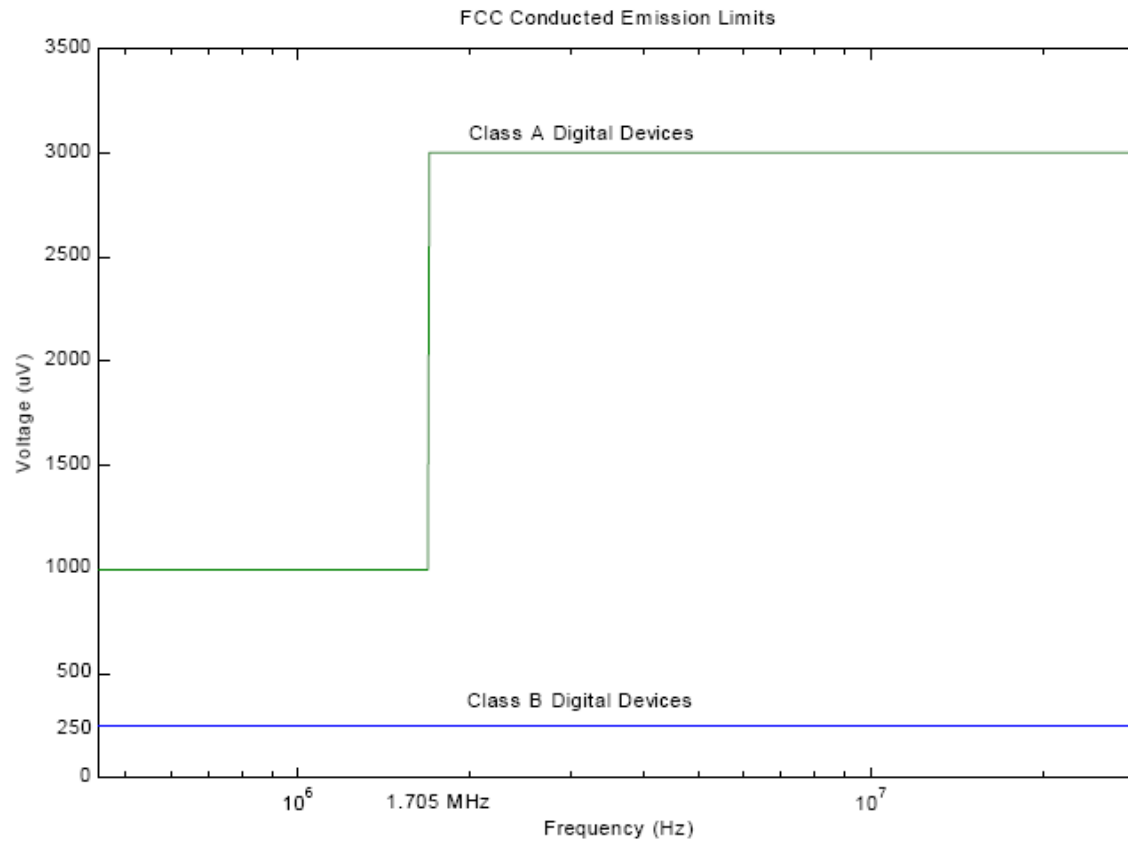
Se tutte le volte che si accende la lavapiatti questa genera un transitorio sulla rete fuori della maschera di tolleranza che fa sì che si spenga la televisione le cose non vanno bene.

Occorre quindi verificare che cosa un dispositivo generi sul proprio cavo di alimentazione. In altre parole ogni dispositivo connesso alla rete non è solo vittima di disturbi condotti ma anche sorgente degli stessi

## Disturbi condotti

### Normative

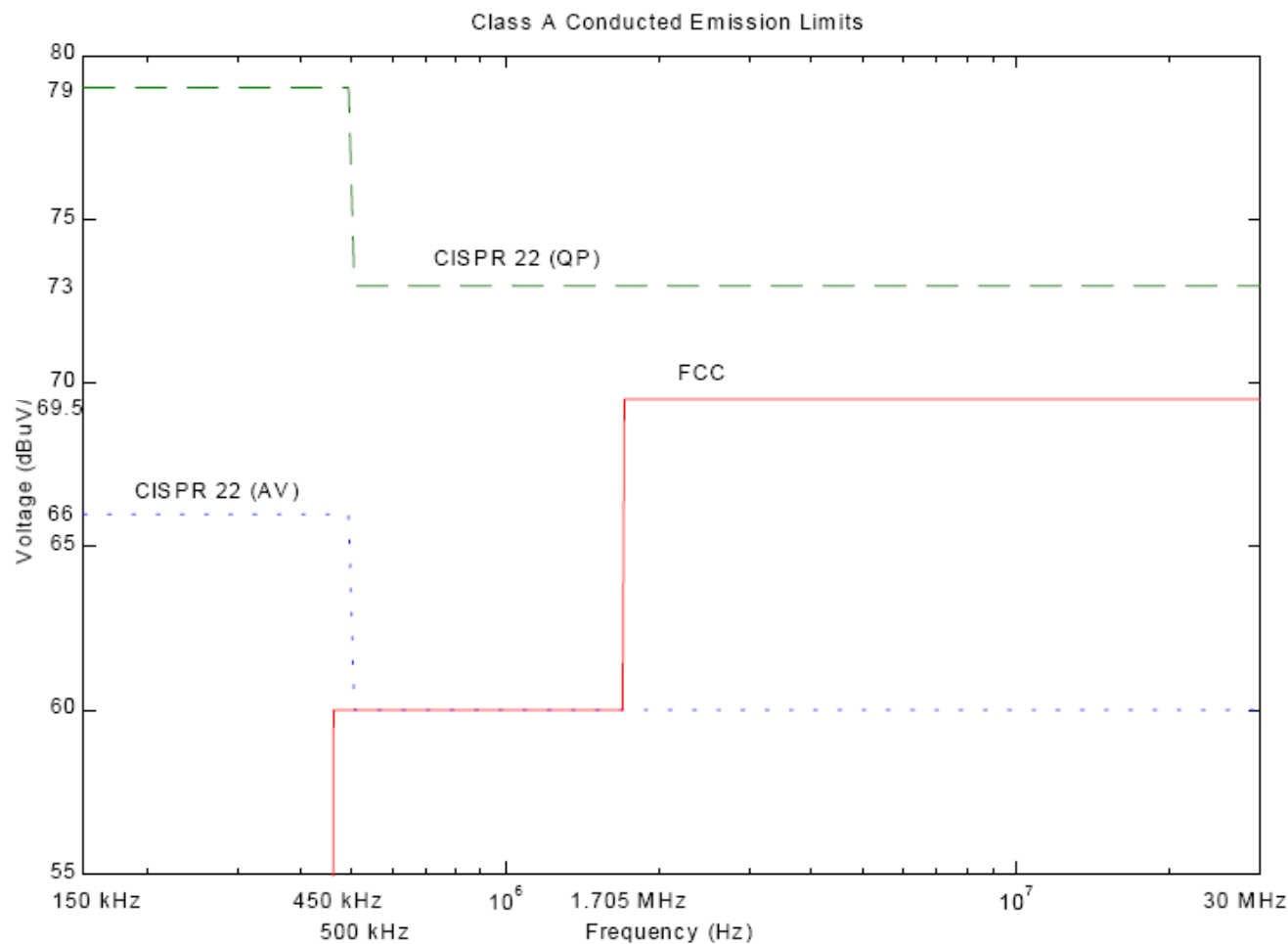
Le maschere da soddisfare per disturbi condotti sono FCC:



## Disturbi condotti

### Normative

Le maschere da soddisfare per disturbi condotti sono FCC Classe A e CISPR 22:

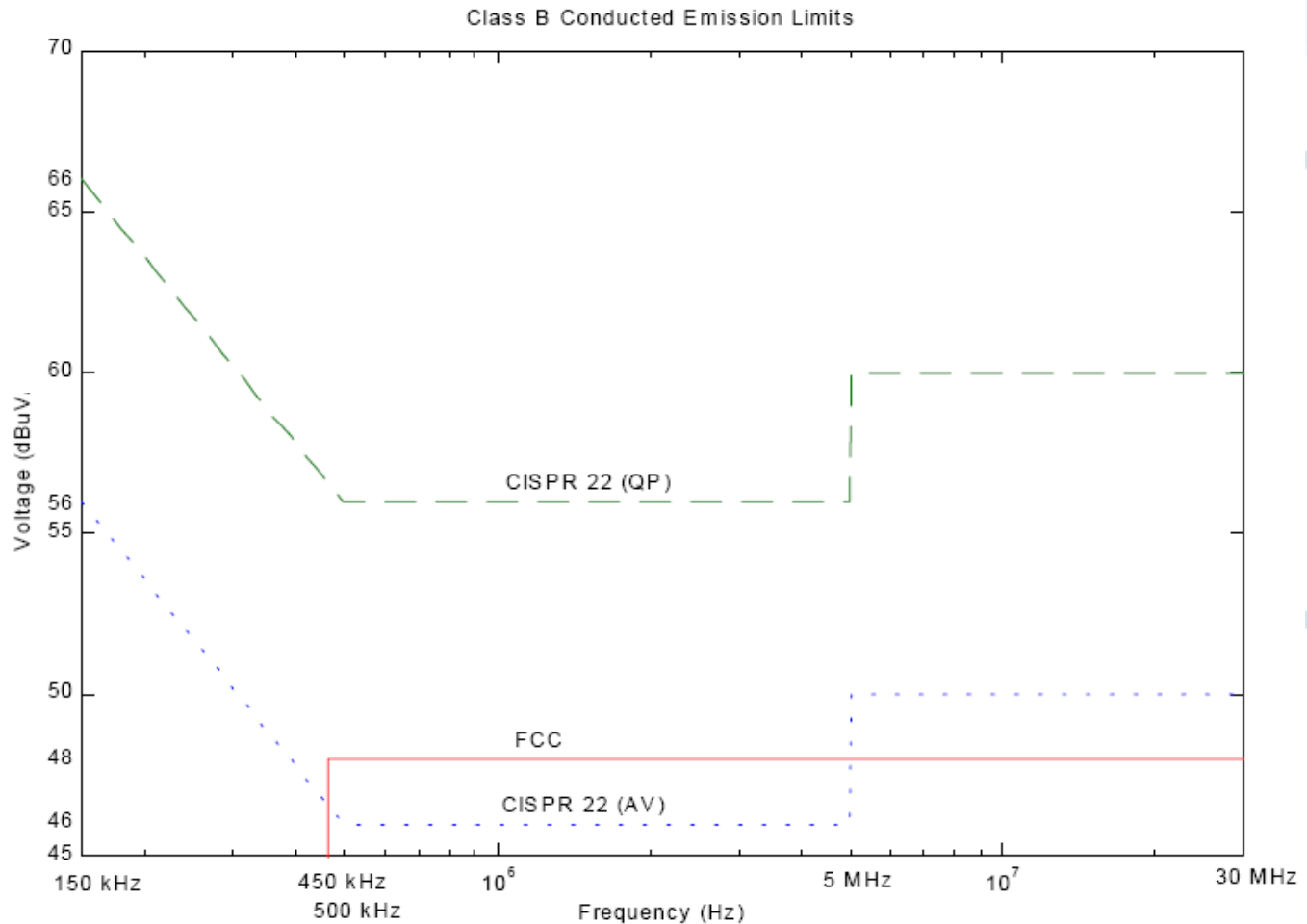




## Disturbi condotti

### Normative

Le maschere da soddisfare per disturbi condotti sono FCC Classe B e CISPR 22:



## Disturbi condotti

Il primo passo è riconoscere il tipo di comportamento non desiderato, definire un apposito set-up di misura per quantificarlo e confrontarlo con i livelli di tolleranza ritenuti accettabili.

Un dispositivo correttamente funzionante collegato all'alimentazione assorbe dal filo della *fase* una corrente che idealmente, si richiude con una corrente di ritorno che fluisce uguale in modulo e opposta in verso sul filo *neutro*.

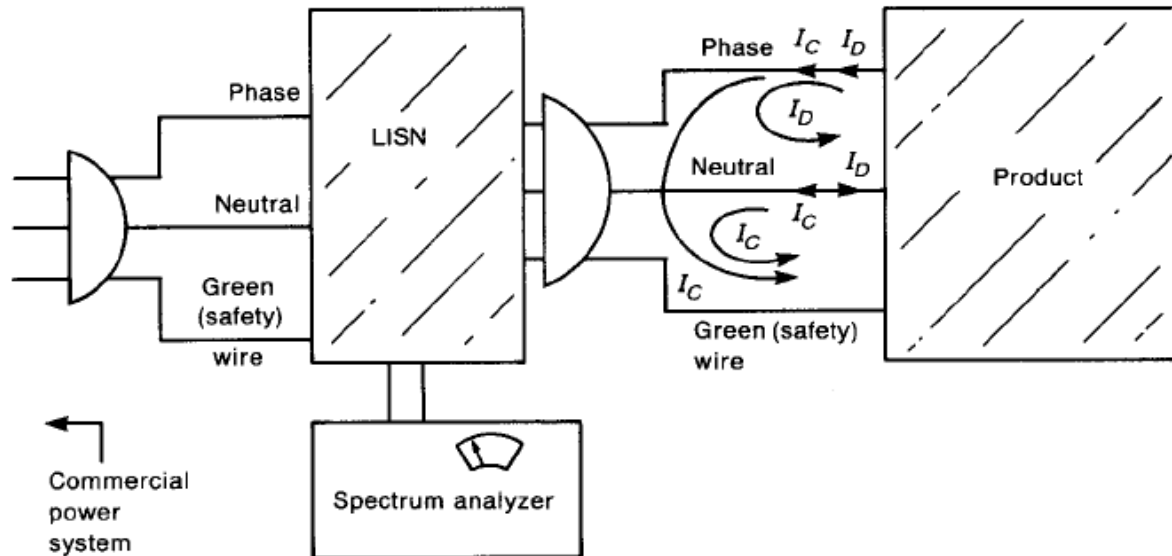
Tali correnti uguali e opposte si dice diano luogo a un *modo differenziale*. La presenza di eventuali correnti sulla terza linea, o *terra* sono invece indesiderate e possono causare l'insorgenza di un *modo comune* fra fase e neutro, con correnti uguali in modulo e verso.

Il modo comune è indesiderato e causa di emissione condotta sulla linea

## Disturbi condotti

La misura delle emissioni condotte dei dispositivi (FCC e CISPR 22) sono effettuate nel range 150kHz – 30 MHz.

La misura viene effettuata interponendo una *rete stabilizzatrice d'impedenza* (LISN – *Line Impedance Stabilization Network*) da interporci fra la rete di alimentazione vera e propria e il dispositivo



## Disturbi condotti

La misura delle emissioni condotte non può essere effettuata tramite una semplice sonda di corrente.

L'impedenza vista dal dispositivo verso la rete è una funzione non uniforme della frequenza. Questa funzione varia da edificio a edificio e da presa elettrica a presa elettrica in uno stesso edificio.

La necessità di avere misure standardizzate e riproducibili porta a dover individuare una rete standard che stabilizzi questa impedenza.

L'alimentazione passa attraverso il LINS in modo praticamente trasparente, mentre il LINS stesso fa sì che l'impedenza vista dal dispositivo verso la rete sia un valore standardizzato, costante su tutta la banda e ben definito.

Inoltre l'eventuale rumore presente sulla linea di alimentazione può entrare nel dispositivo, influenzarlo e "riuscirne", influenzando la misura, là dove sarebbe preferibile misurare solo il rumore effettivamente generato dal dispositivo.

## Disturbi condotti

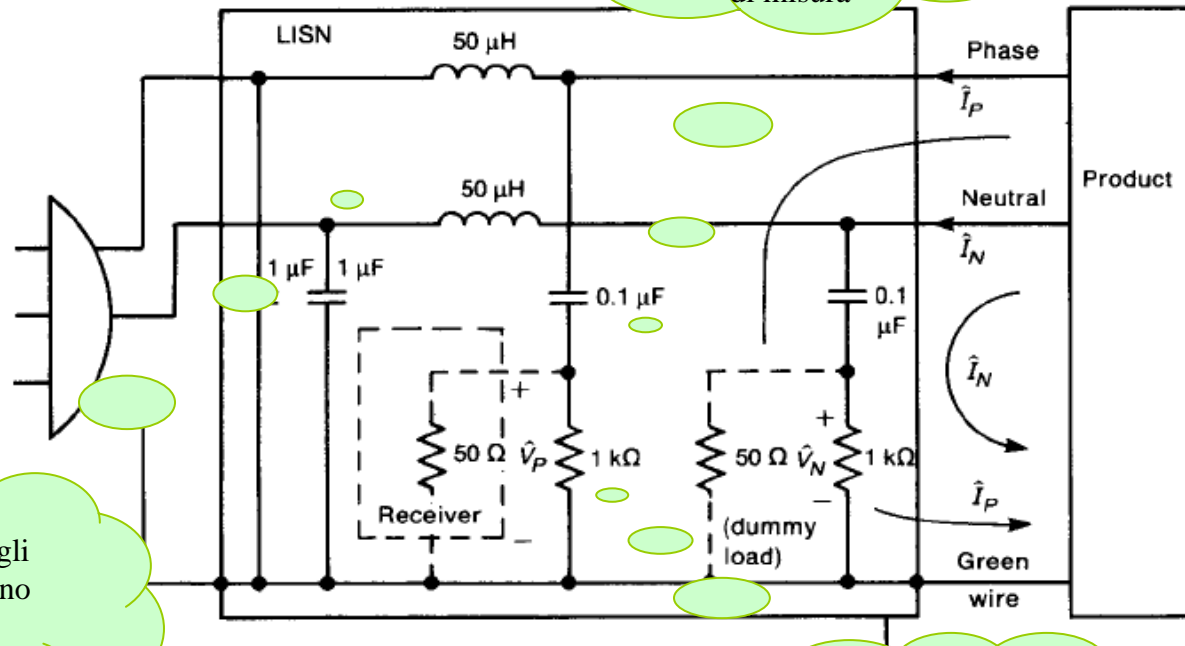
I due compiti del LISN sono quindi:

1. Far sì che il dispositivo veda un'impedenza costante su tutta la banda di interesse connessa in uscita al proprio cavo di alimentazione
2. Bloccare il rumore condotto proveniente dalla linea di alimentazione, in modo che solo il rumore generato dal dispositivo sia misurato.

Questi obiettivi richiedono:

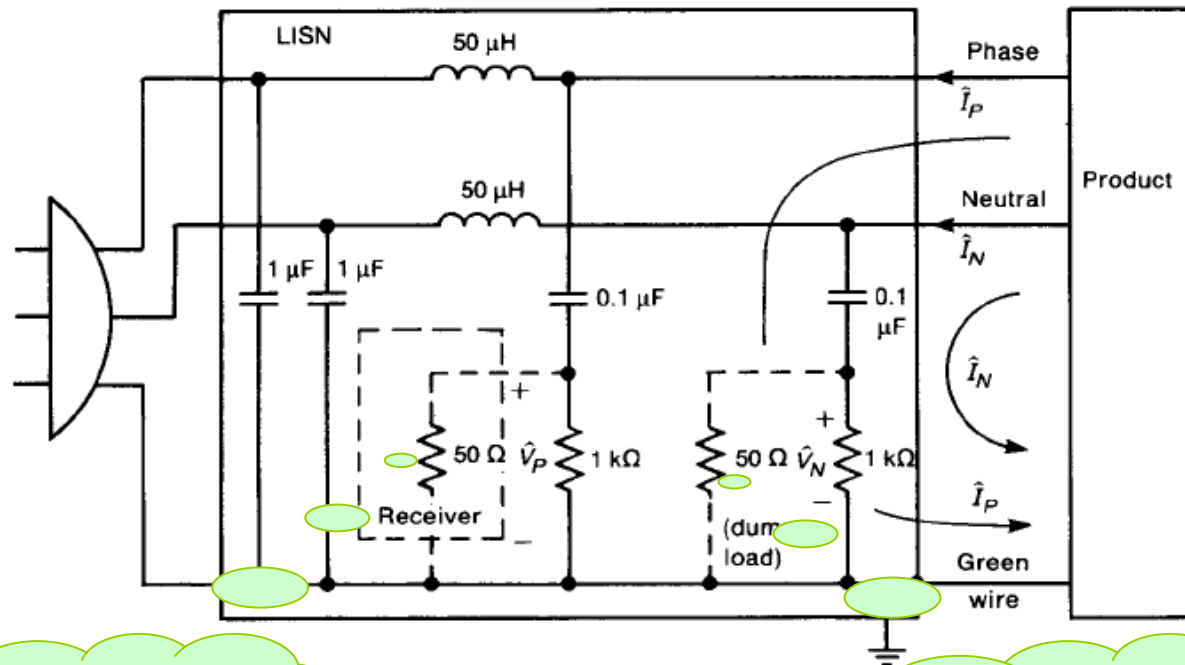
1. Che il dispositivo veda un'impedenza costante ( $50\Omega$ ) tra fase e terra e tra neutro e terra
2. Che il rumore proveniente dalla rete sia filtrato

Compatibilità elettromagnetica II A. A. 2008-09  
S. Selleri  
Dipartimento di Ingegneria delle Telecomunicazioni – Università di Firenze



## Disturbi condotti

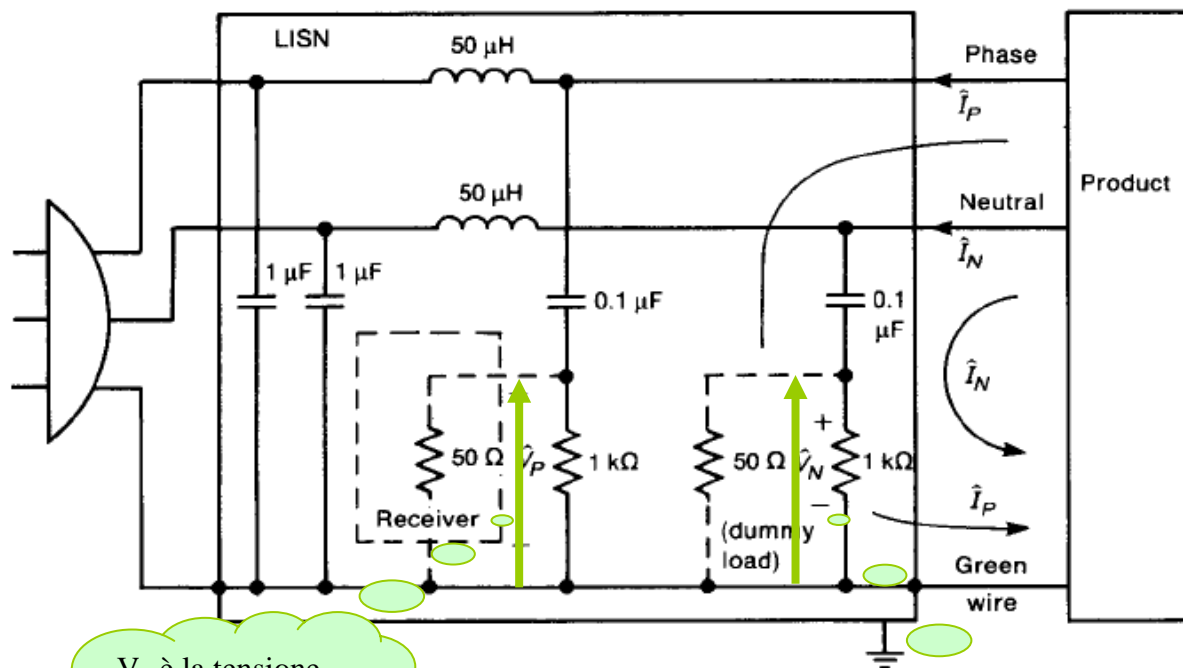
### Layout del LISN:



Questi 50Ω sono  
l'impedenza d'ingresso  
effettiva dell'analizzatore  
di spettro

Questi 50Ω sono un carico  
realmente presente nel  
circuitto che bilancia il  
sistema

## Layout del LISN:



$V_N$  è la tensione  
misurata fra la  
fase e la terra



## Disturbi condotti

Considerando gli elementi che compongono il LINS agli estremi della banda si ha:

Element	$Z_{150\text{ kHz}}$	$Z_{30\text{ MHz}}$
50 $\mu\text{H}$	47.1 $\Omega$	9424.8 $\Omega$
0.1 $\mu\text{F}$	10.61 $\Omega$	0.053 $\Omega$
1 $\mu\text{F}$	1.06 $\Omega$	0.0053 $\Omega$

Se quindi assumiamo che i condensatori siano in pratica cortocircuiti e gli induttori circuiti aperti, si ha:

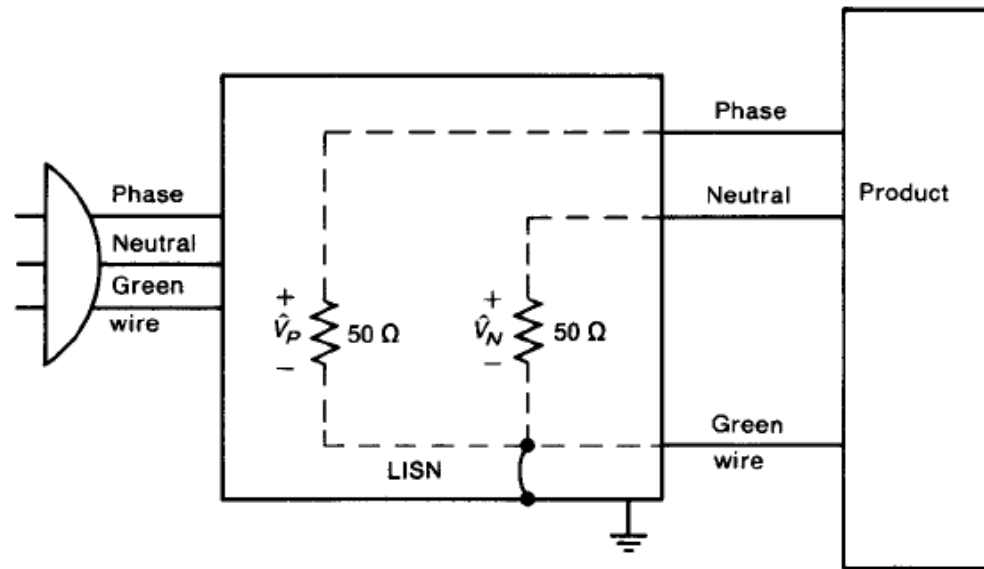
$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_P$$

$$\hat{V}_N = 50\hat{I}_N$$

Dove le correnti sono le effettive sorgenti di interferenza condotta mentre le tensioni verso terra sono le quantità realmente misurabili.

Se ne deduce che le specifiche vengono date rispetto alle quantità effettivamente misurabili (quindi le tensioni) e non rispetto alle vere sorgenti di interferenza (le correnti).

## Disturbi condotti

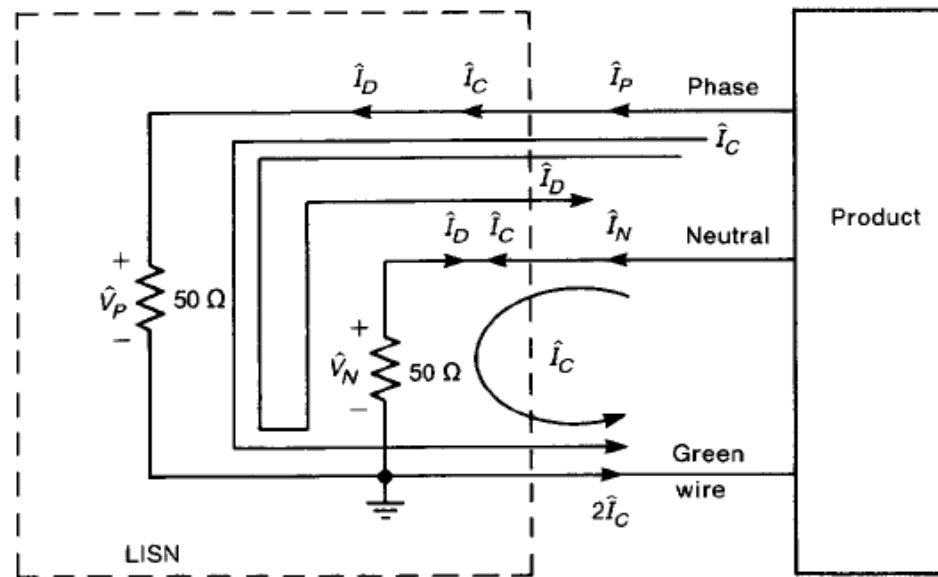


Lo scopo del progettista è far sì che non scorrano correnti sui due resistori da  $50\Omega$  nel range  $150\text{kHz} - 30\text{MHz}$ .

Ogni corrente in questo range può portare alla mancata certificazione del prodotto

Ogni corrente *fuori* da questo range non invalida la certificazione ma può comunque causare interferenza!

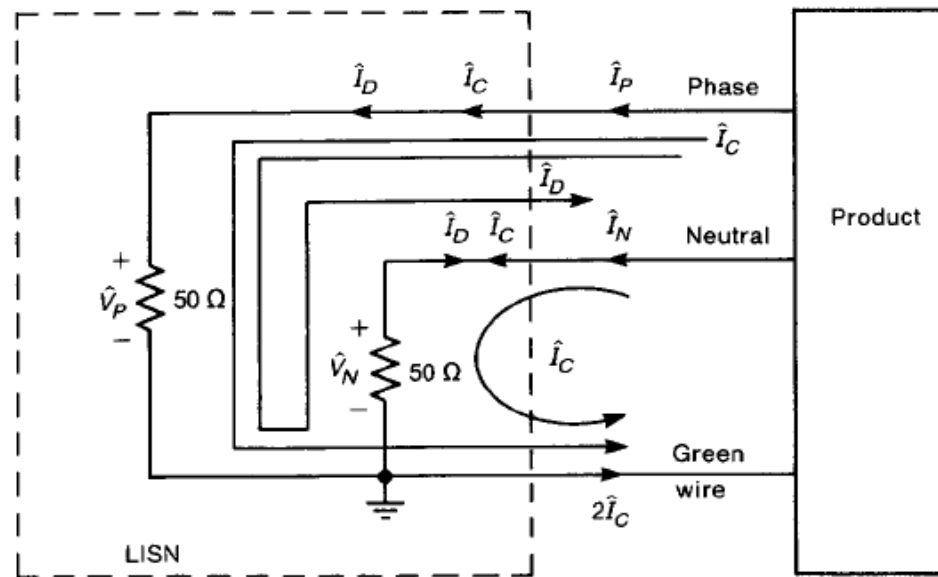
## Disturbi condotti



Se torniamo a vedere le correnti in termini di modo comune e modo differenziale si ha:

$$\begin{aligned} \hat{I}_P &= \hat{I}_C + \hat{I}_D \\ \hat{I}_N &= \hat{I}_C - \hat{I}_D \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \hat{I}_D &= \frac{1}{2}(\hat{I}_P - \hat{I}_N) \\ \hat{I}_C &= \frac{1}{2}(\hat{I}_P + \hat{I}_N) \end{aligned}$$

## Disturbi condotti



La misura fornisce

$$\hat{V}_P = 50(\hat{I}_C + \hat{I}_D)$$

$$\hat{V}_N = 50(\hat{I}_C - \hat{I}_D)$$

## Disturbi condotti

È importante capire come nel caso di rumore condotto non vi è alcuna garanzia che le correnti di modo comune siano inferiori a quelle di modo differenziale.

È anche importante capire che le correnti di modo differenziale *non* sono le correnti di alimentazione ma sono un qualcosa di sovrainposto che è comunque *indesiderato*

In genere una delle due componenti domina, per cui:

$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_C \quad \text{se } \hat{I}_C \gg \hat{I}_D$$

$$\hat{V}_N = 50\hat{I}_C \quad \text{se } \hat{I}_C \gg \hat{I}_D$$

$$\hat{V}_P = 50\hat{I}_D \quad \text{se } \hat{I}_C \ll \hat{I}_D$$

$$\hat{V}_N = -50\hat{I}_D \quad \text{se } \hat{I}_C \ll \hat{I}_D$$

## Disturbi condotti

Per poter soddisfare le specifiche sulle emissioni condotte praticamente tutti i dispositivi sono dotati di un filtro che disaccoppi l'elettronica interna dall'alimentazione.

Tali filtri sono costituiti da elementi progettati vuoi per eliminare le correnti di modo comune vuoi per eliminare le correnti di modo differenziale

Aver distinto le correnti in modo comune e modo differenziale ed aver individuato dei componenti che hanno effetto solo su una di queste due correnti permette un controllo completo e flessibile delle emissioni condotte.

## Disturbi condotti

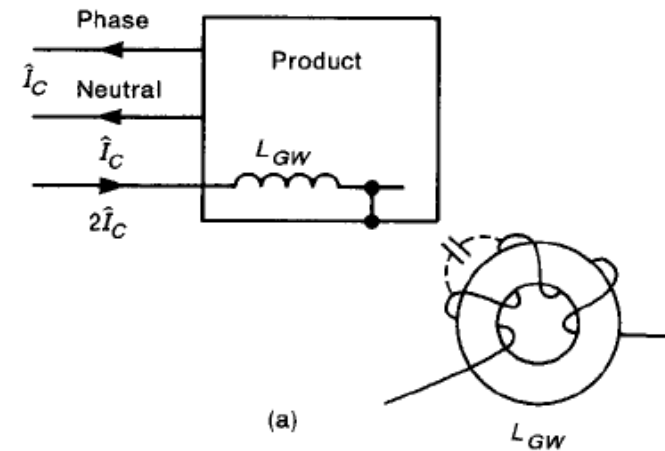
### Blocco del modo comune

La corrente di modo comune fluisce, con intensità doppia, sul filo di terra.

L'introduzione di un induttore immediatamente all'interno del case del dispositivo sul filo di terra blocca le correnti a radiofrequenza di modo comune ma permette ancora la scarica verso terra per le correnti di guasto.

Per ragioni di sicurezza è inopportuno interrompere il filo di terra per inserirvi un induttore. Si preferisce in genere mantenere il filo integro e creare l'induttore con avvolgimenti su un nucleo di ferrite

Valori tipici per questa induttanza sono 0.5mH, che fornisce un'impedenza di 471W all'estremo inferiore della banda. All'estremo superiore il valore non è necessariamente più elevato per le capacità parassite.

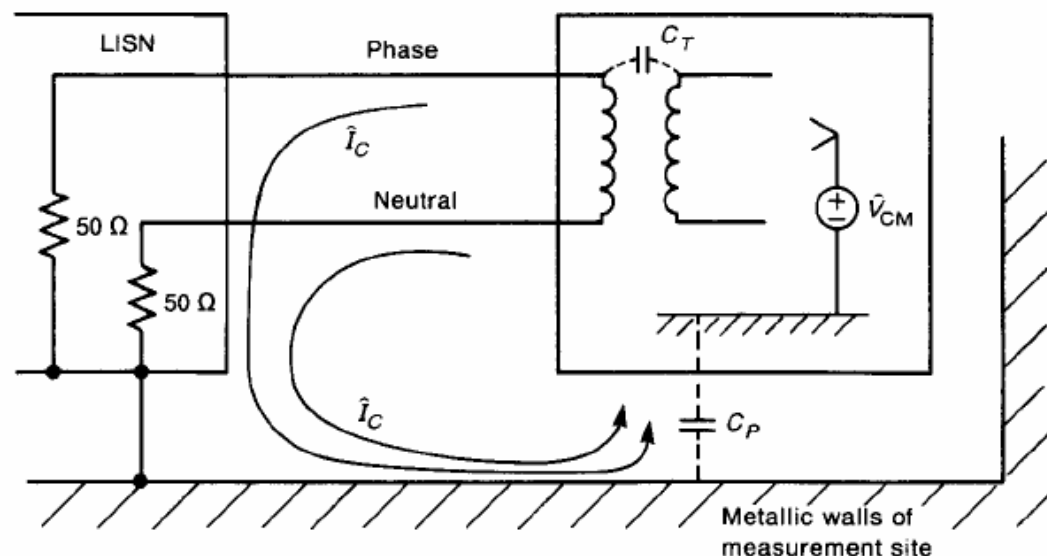


## Disturbi condotti

### Blocco del modo comune

Un'altra tecnica è quella di avere un prodotto a “due fili” ovvero solo fase e neutro.

Il prodotto è comunque protetto per le correnti di guasto in quanto il neutro è connesso a terra a livello di scatola di distribuzione e la fase è “calda” rispetto a terra.



Non è però possibile collegare il neutro allo chassis del dispositivo in quanto non c'è alcuna certezza che l'utente inserisca la spina nella presa nel modo corretto...

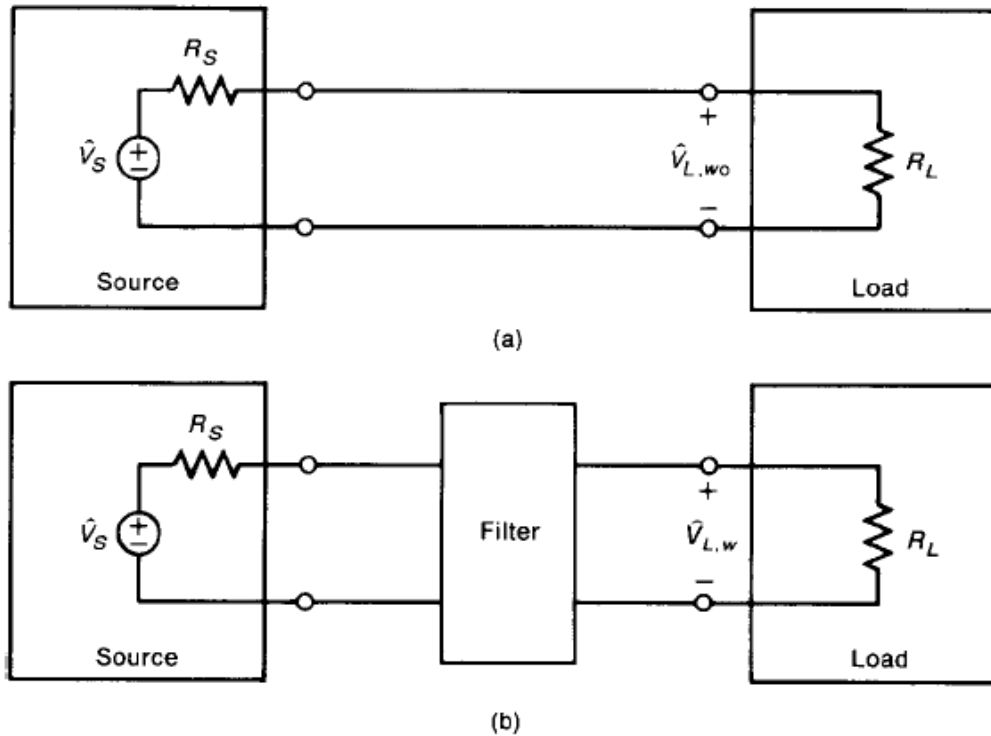
Per aggirare il problema i prodotti a due fili utilizzano al loro interno un trasformatore. Lo chassis è collegato al terminale freddo del secondario.

In realtà il montaggio non elimina completamente le correnti di modo comune perché la capacità parassita fra lo chassis e l'ambiente può creare un percorso di richiusura per queste correnti.



## Disturbi condotti

### Blocco del modo differenziale



$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{L,wo}}{P_{L,w}} \right)$$

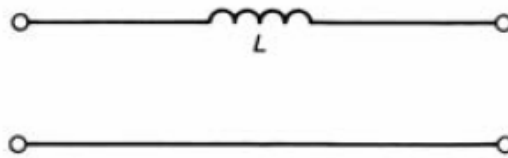
$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{L,wo}}{V_{L,w}} \right)$$

L'inserimento di un filtro determina una perdita di inserzione definita in potenza o tensione

## Disturbi condotti

### Blocco del modo differenziale

Studiamo il tipo di passa-basso più semplice:



La tensione sul carico in *assenza* di filtro è

$$\hat{V}_{L,wo} = \frac{R_L}{R_S + R_L} \hat{V}_S$$

La tensione sul carico in *presenza* di filtro è

$$\hat{V}_{L,w} = \frac{R_L}{R_S + j\omega L + R_L} \hat{V}_S = \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{1}{1 + \frac{j\omega L}{R_L + R_S}} \hat{V}_S$$

## Disturbi condotti

### Blocco del modo differenziale

Di conseguenza la perdita di inserzione è

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left( 1 + \frac{j\omega L}{R_s + R_L} \right)$$

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} (1 + (\omega\tau)^2)$$

Avendo definito

$$\tau = \frac{L}{R_s + R_L}$$

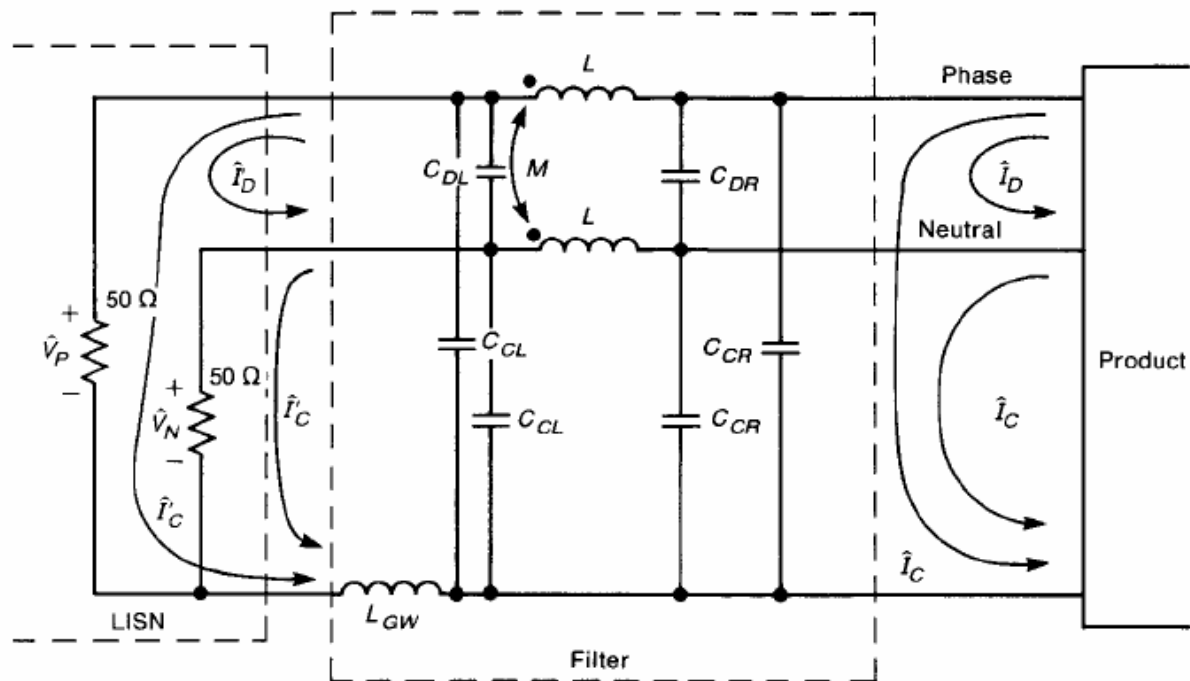
La costante di tempo del circuito.

Quello che è importante notare non è tanto il valore da dare a  $L$  quanto il fatto che la risposta del filtro varia in funzione della resistenza interna del generatore e del carico, quest'ultimo, nel nostro caso è la linea ed è estremamente variabile, quindi questo set-up non è adeguato.

## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione

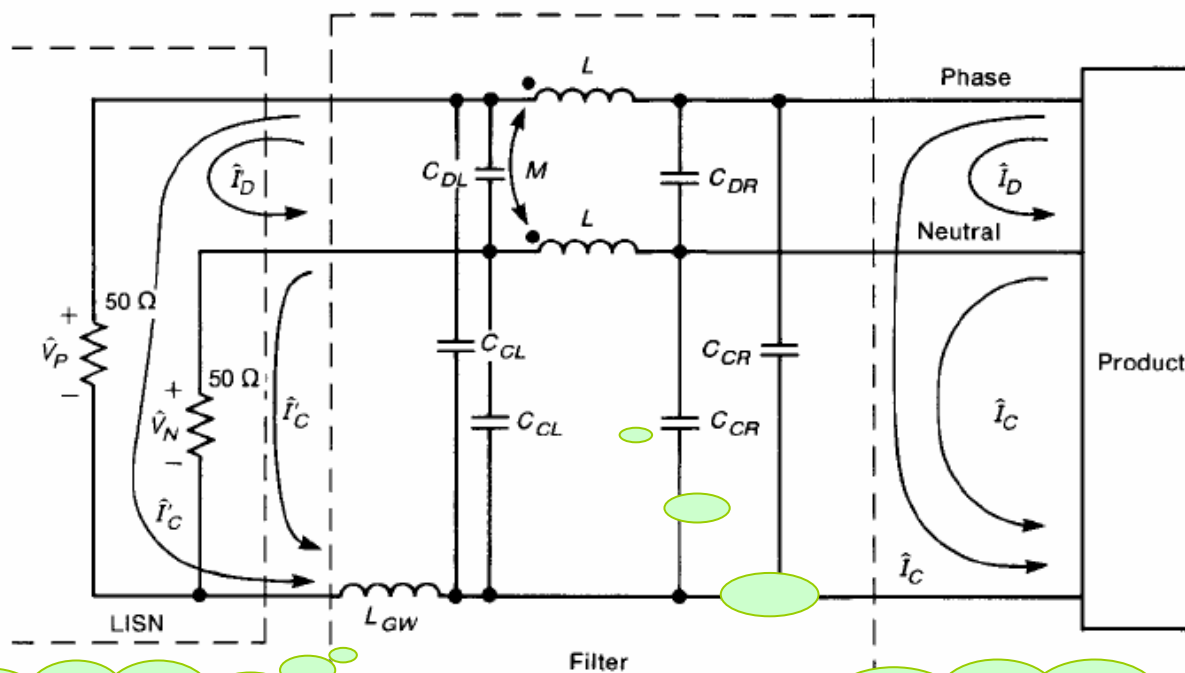
Una topologia tipica e generale per il filtro di alimentazione:



Lo scopo del filtro è ridurre le correnti di modo comune e differenziale in uscita al dispositivo in nuove correnti (quelle con l'apice) in ingresso alla rete che soddisfino le specifiche

## Disturbi condotti

## Filtro di alimentazione – Effetto sul modo comune



Questa induttanza ostacola la corrente di modo comune che si richiude sul filo di terra

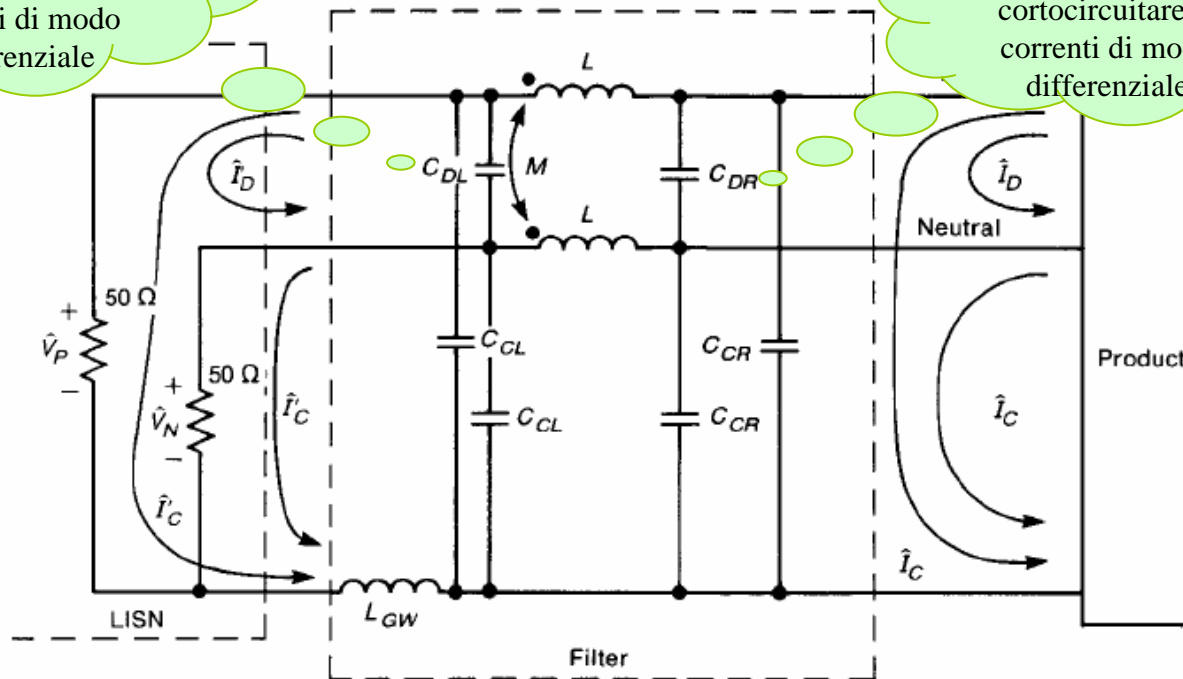
Le capacità fra fase e terra e fra neutro e terra tendono a cortocircuitare le correnti di modo comune

# Disturbi condotti

## Filtro di alimentazione – Effetto sul modo differenziale

Le capacità fra fase e neutro tendono a cortocircuitare le correnti di modo differenziale

Le capacità fra fase e neutro tendono a cortocircuitare le correnti di modo differenziale



## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione

Le capacità fra fase e neutro devono garantire l'isolamento ai 50Hz per far funzionare correttamente il dispositivo. I capacitori conformi agli standard per questo scopo sono marcati *X-caps*.

Le capacità fra fase e terra devono garantire l'isolamento ai 50Hz per far funzionare correttamente il dispositivo. Inoltre devono essere più sicuri dei precedenti perché, se per un guasto si cortocircuita il condensatore fra fase e terra sulla terra, e quindi sul case del dispositivo, arrivano 220V, con evidente rischio di folgorazione. I capacitori conformi agli standard per questo scopo sono marcati *Y-caps*.

Valori tipici per questi condensatori sono

$$C_{DR} = C_{DL} = 0.047 \mu F$$

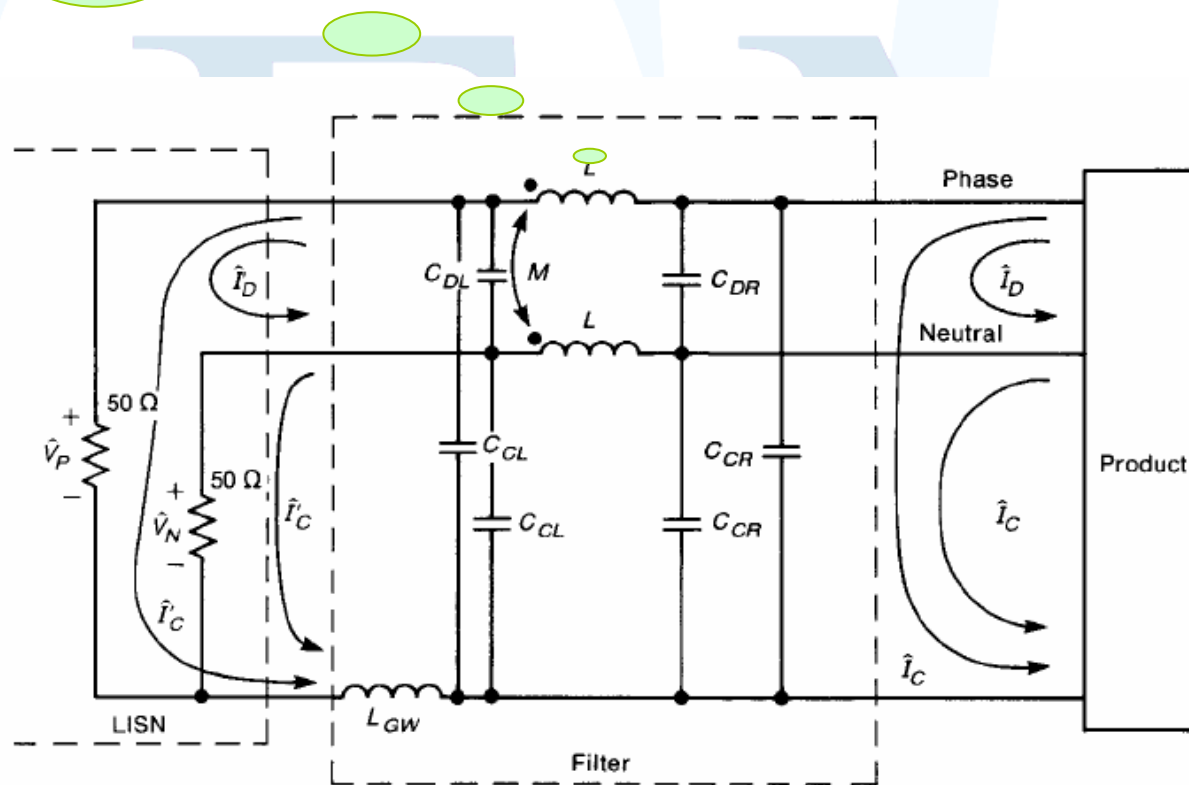
$$C_{CR} = C_{CL} = 2200 pF$$

Anche se spesso possono essere presenti anche solo i condensatori di destra o di sinistra.

## Disturbi condotti

## Filtro di alimentazione – Effetto sul modo comune

Infine vi è un choke di modo comune realizzato da due induttori mutuamente accoppiati su fase e neutro





## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione – Effetto sul modo comune

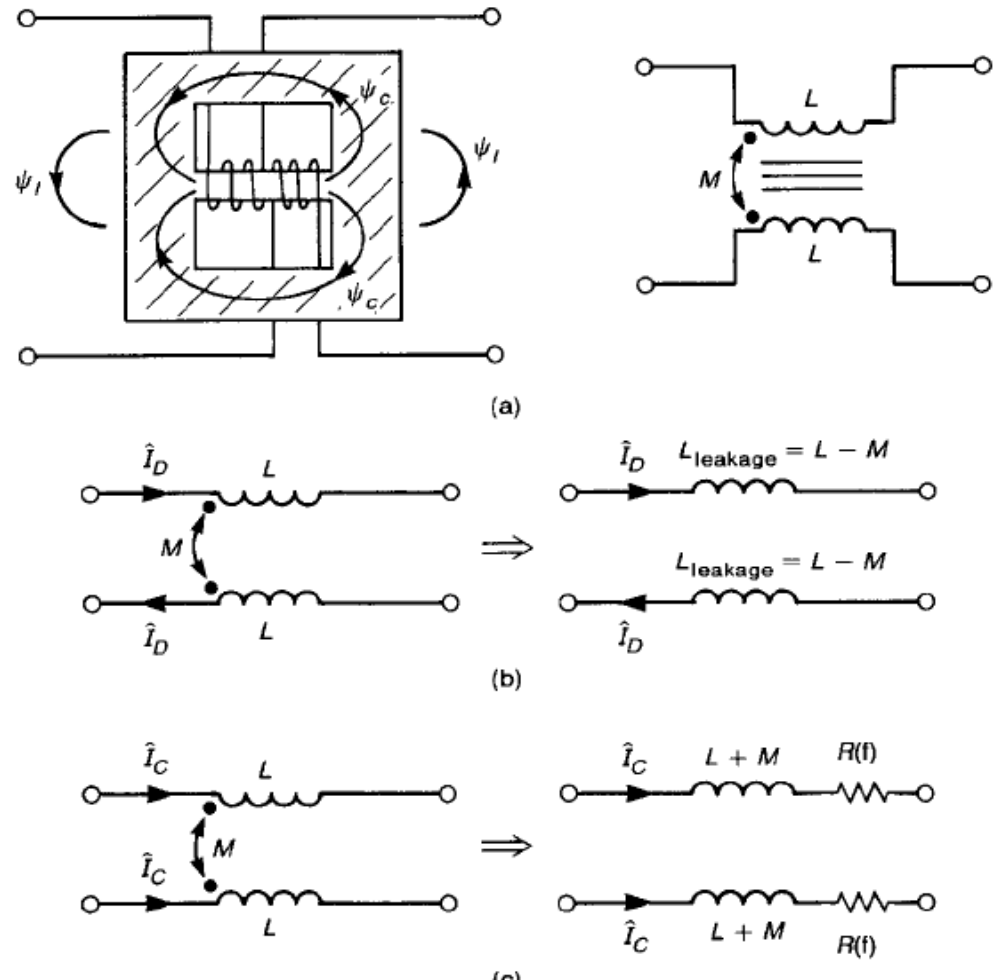
Il choke è realizzato con un numero di giri su un core di ferrite comune. Ogni induttore ha un'autoinduttanza  $L$  e una mutua induttanza  $M$ .

In presenza di correnti di modo differenziale la mutua induttanza si sottrae all'autoinduttanza.

Per correnti di modo comune si somma.

Se gli avvolgimenti sono identici ed effettuati su un core comune è

$$L \approx M$$



## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione – Effetto sul modo comune

Realizzando un valore di induttanza di

$$L = 10mH$$

Si ha, per il modo differenziale, un'impedenza praticamente nulla e, per il modo comune, un'impedenza

$$j\omega(L + M) \approx j2\omega L$$

Che, a 150kHz vale

$$j2\omega L = 18850\Omega$$

Questo ovviamente è un valore teorico che nella realtà è degradato dalle capacità parassite.

## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione

È importante enfatizzare come sul choke passi anche la corrente di alimentazione, che, tipicamente, è di qualche ampere.

Questa corrente può generare campi magnetici di intensità sufficiente a saturare la ferrite.

Una ferrite saturata ha un valore di  $\mu$  che tende a quello dell'aria, degradando quindi il valore dell'induttanza e diminuendo l'efficacia del choke.

Se però la corrente di alimentazione è perfettamente differenziale, come nel caso ideale, essa non genera flusso di induzione magnetica nel nucleo.

## Disturbi condotti

### Filtro di alimentazione – Tuning

A ogni data frequenza può essere dominante o la corrente di modo comune o la corrente di modo differenziale.

Per correggere il problema occorre intervenire sul valore del componente che ha effetto sul modo dominante.

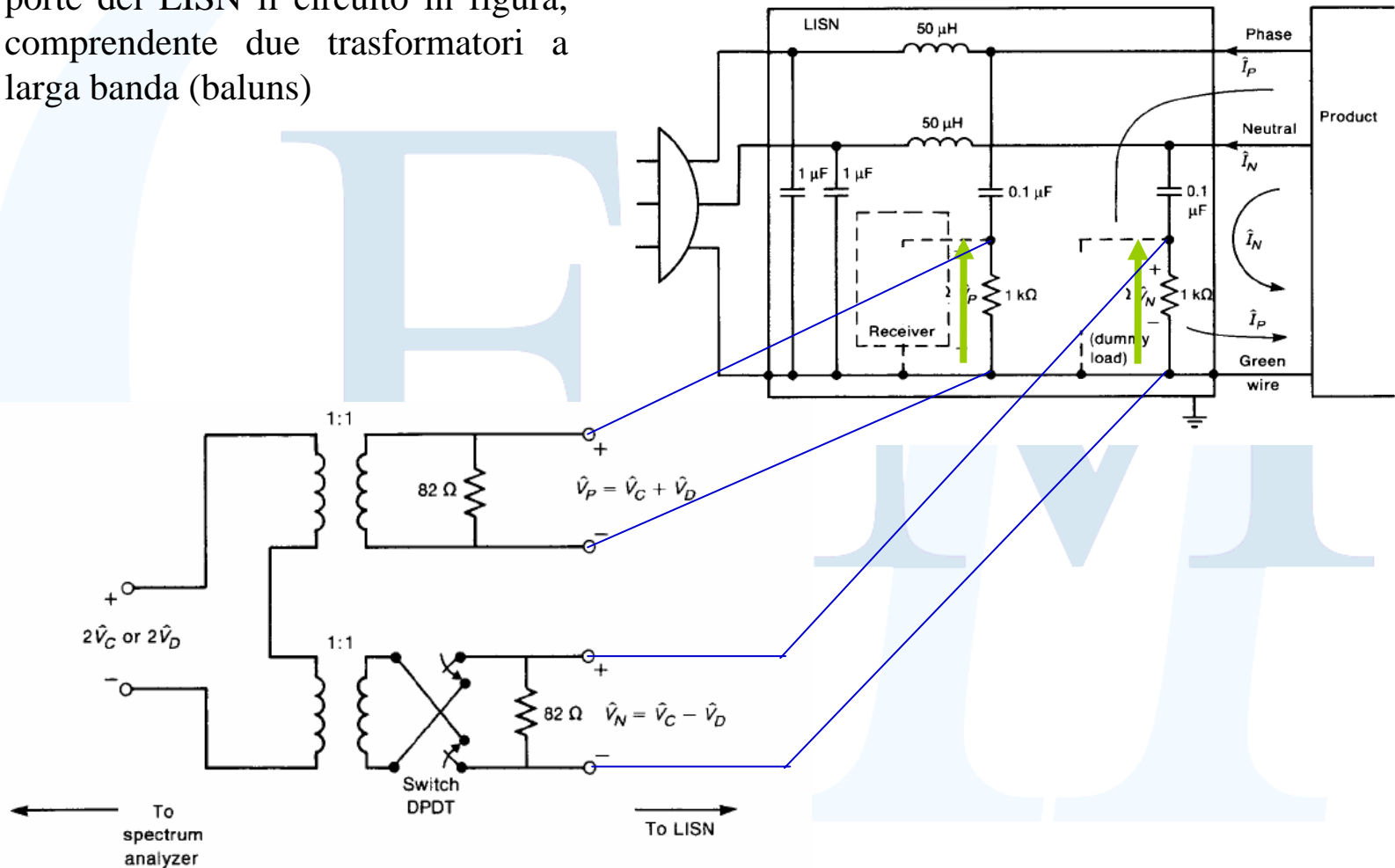
Se, in fase di test, si nota che il cambiare anche drasticamente il valore di un componente non porta a variazioni significative dell'emissione condotta, significa che stiamo agendo sul modo non dominante.

Per operare efficacemente occorre quindi essere in grado di misurare quale sia l'emissione condotta di modo comune e quale sia quella di modo differenziale, separatamente.

# Disturbi condotti

## Filtro di alimentazione – Tuning

Si può quindi collegare alle due porte del LISN il circuito in figura, comprendente due trasformatori a larga banda (baluns)



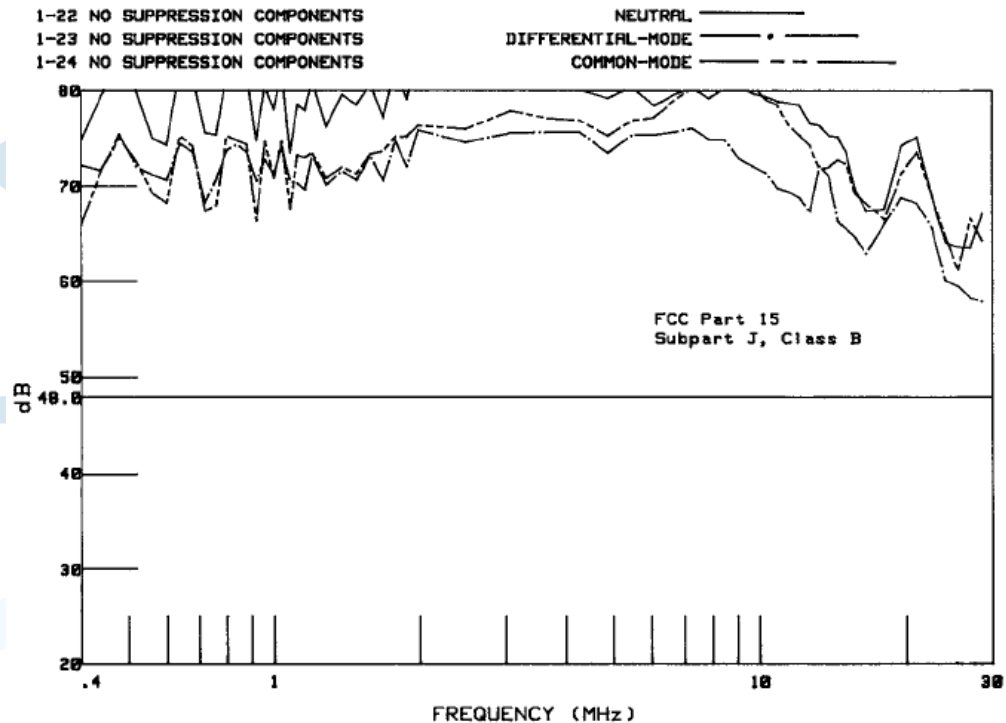
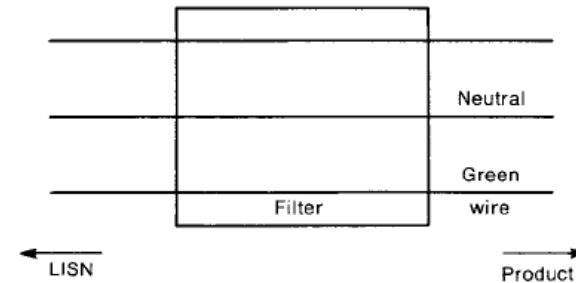
## Disturbi condotti

### Esempio

In assenza di filtro l'analizzatore di spettro misura all'uscita del LISN disturbi condotti nel range di 70-80dB $\mu$ V.

Ricordiamo che il limite FCC per la classe B è 48dB $\mu$ V.

Notiamo anche come i disturbi di modo comune e differenziale siano dello stesso ordine di grandezza.

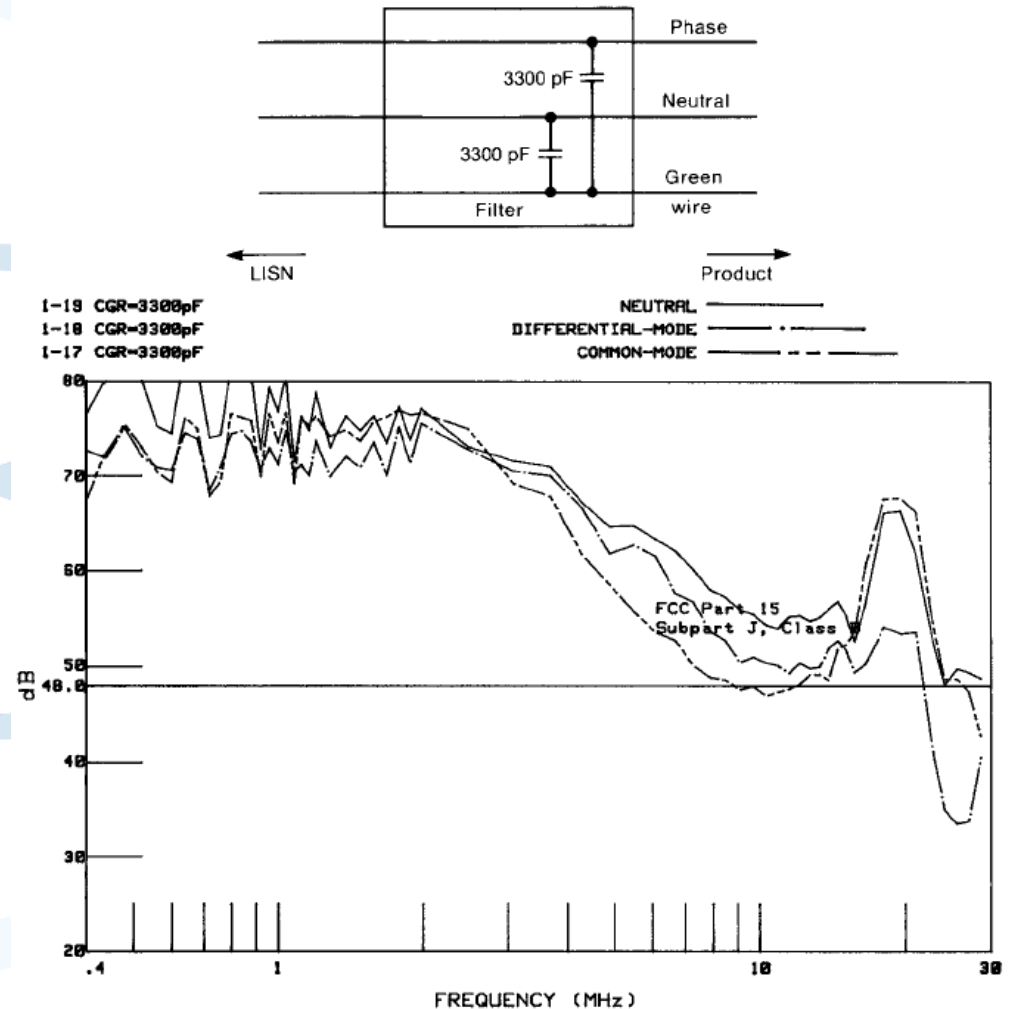


## Disturbi condotti

### Esempio

Per prima cosa inseriamo dei condensatori da 3300pF tra fase e terra e fra neutro e terra.

Questi condensatori sono in effetti in parallelo ai carichi da  $50\Omega$  del LISN e quindi tendono a cortocircuitare sia il modo comune sia il modo differenziale a partire da quella frequenza per cui la loro impedenza scende sotto  $50\Omega$ , ovvero 1MHz.



## Disturbi condotti

### Esempio

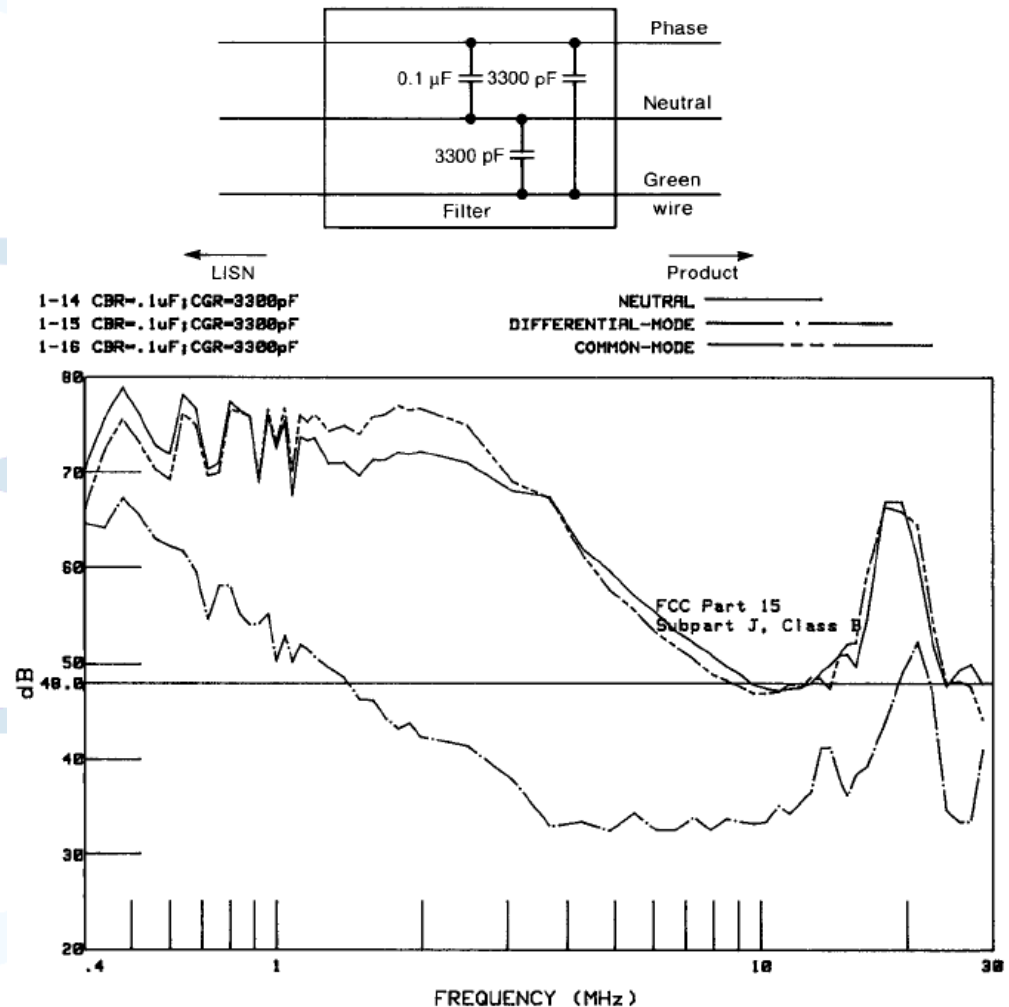
Come secondo componente si inserisce un condensatore da  $0.1\mu\text{F}$  tra fase e neutro.

Si noti l'atteso crollo del disturbo di modo differenziale, cortocircuitato da questo condensatore.

La teoria ci dice che l'effetto di questo condensatore si sente quando la capacità

$$2C_D + C_C = 2.033\mu\text{F}.$$

Fornisce un'impedenza da  $50\Omega$ , ovvero a  $15.7\text{kHz} \ll 450\text{kHz}$ .





## Disturbi condotti

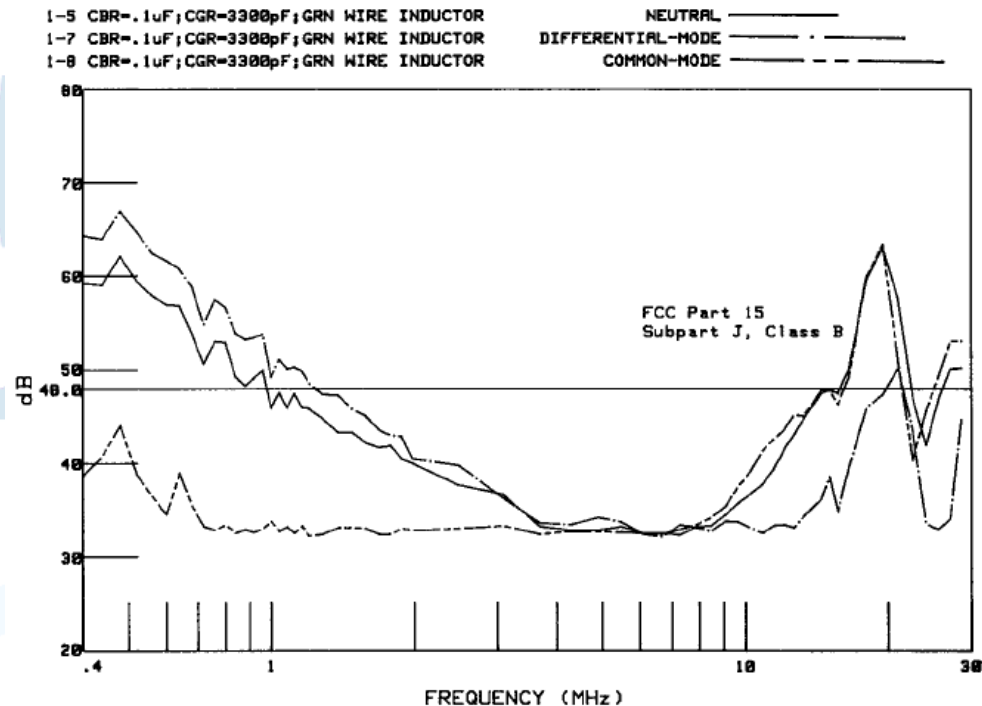
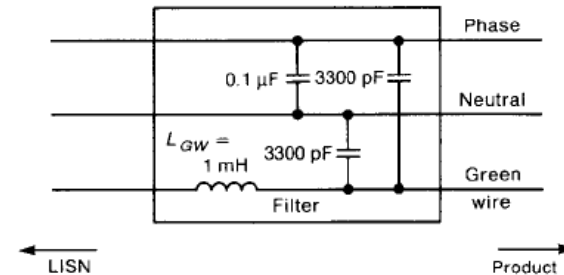
### Esempio

Il terzo passo è indirizzato al modo comune.

Si inserisce un induttore da 1mH sulla linea di terra.

L'effetto salutare è evidente. Le correnti di modo comune si trovano quasi ovunque in specifica, quelle di modo differenziale restano invariate.

L'effetto dell'induttore si sente a partire da quella frequenza per cui  $2\omega L = 50\Omega$ , ovvero 4kHz.



## Disturbi condotti

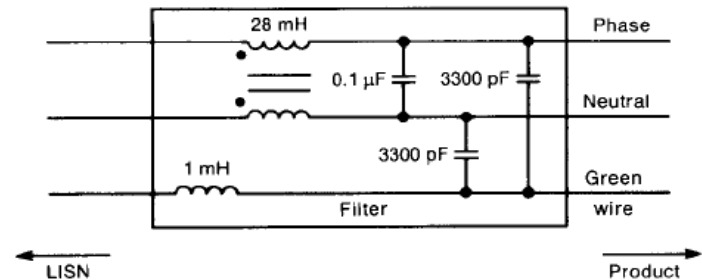
### Esempio

Infine si inserisce un choke da 28mH.

Questo influenza in modo abbastanza limitato il modo comune ma ha un effetto molto forte sul modo differenziale, contrariamente a quanto ci si aspettava!

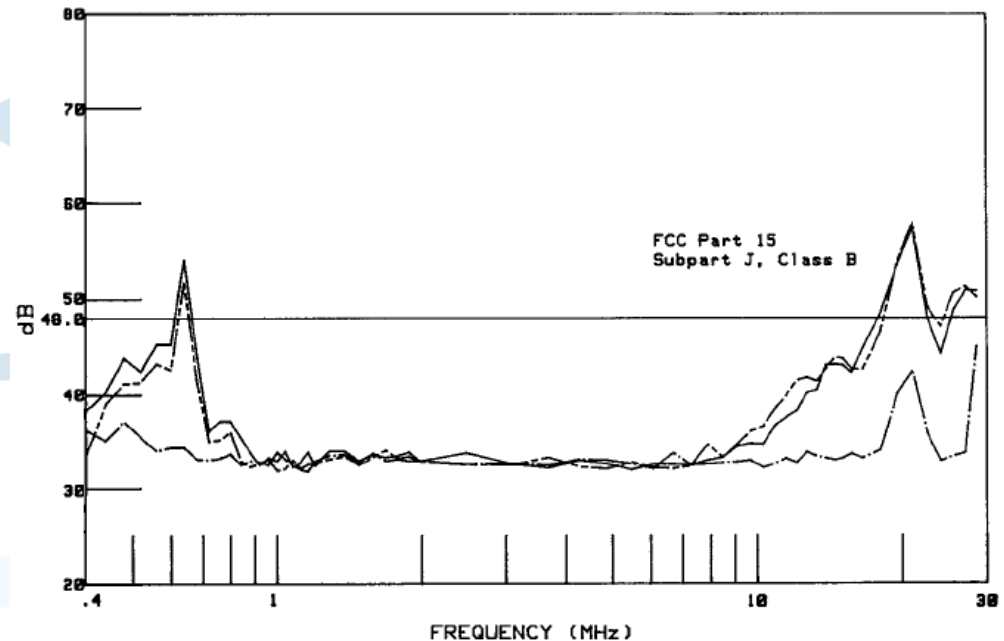
La ragione per cui il modo comune non è ulteriormente ridotto è che l'induttore di terra l'aveva già ridotto al limite del rumore di fondo dell'analizzatore.

Il modo differenziale è invece influenzato dai comportamenti non ideali del choke



1-3 CBR=.1uF;CGR=3300pF;GRN WIRE INDUCTOR;CHOKE  
1-2 CBR=.1uF;CGR=3300pF;GRN WIRE INDUCTOR;CHOKE  
1-1 CBR=.1uF;CGR=3300pF;GRN WIRE INDUCTOR;CHOKE

NEUTRAL ———  
DIFFERENTIAL-MODE - - -  
COMMON-MODE - - -



## Alimentatori

In un sistema la parte che è più probabilmente sorgente di disturbi condotti è l'alimentatore, ovvero la parte deputata a trasformare la tensione di rete nella tensione richiesata dal sistema (mormalmente una o più tensioni continue)

Trattandosi della parte del sistema direttamente connessa all'alimentazione ogni sorgente di rumore nell'alimetatore si trova immediatamente connessa alla linea.

Sebbene i filtri mostrati in precedenza possano gestire questa problematica è bene comprenderla per poter, se possibile, agire alla fonte del rumore.

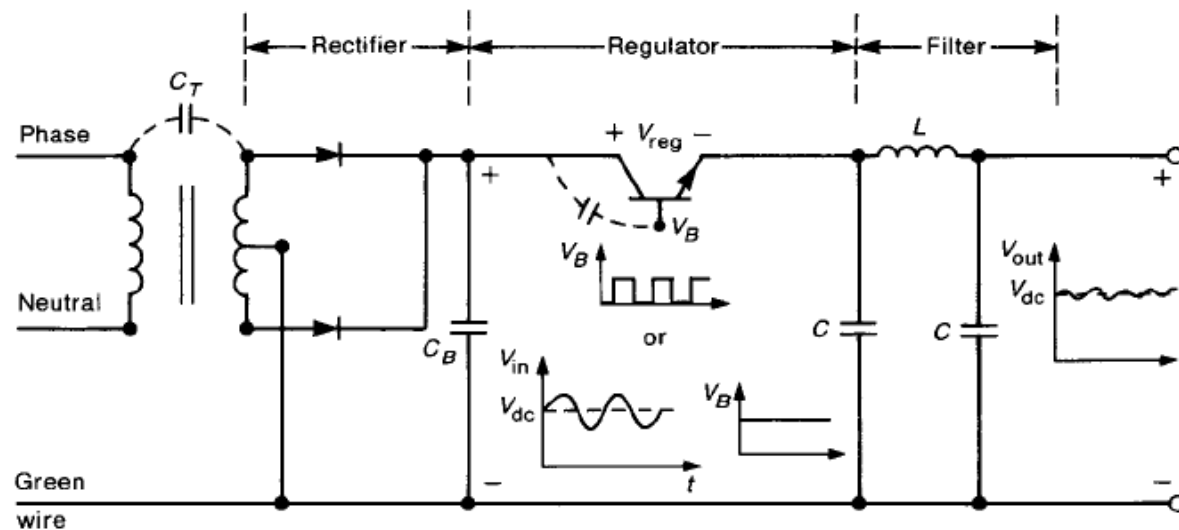
Distinguiamo due categorie principali di alimentatori:

- ❖ Alimentatori lineari
- ❖ Alimentatori switching

## Alimentatori Lineari

L'alimentatore lineare raddrizza la tensione sinusoidale di linea, la regolarizza e la filtra in modo da ottenere la tensione continua desiderata.

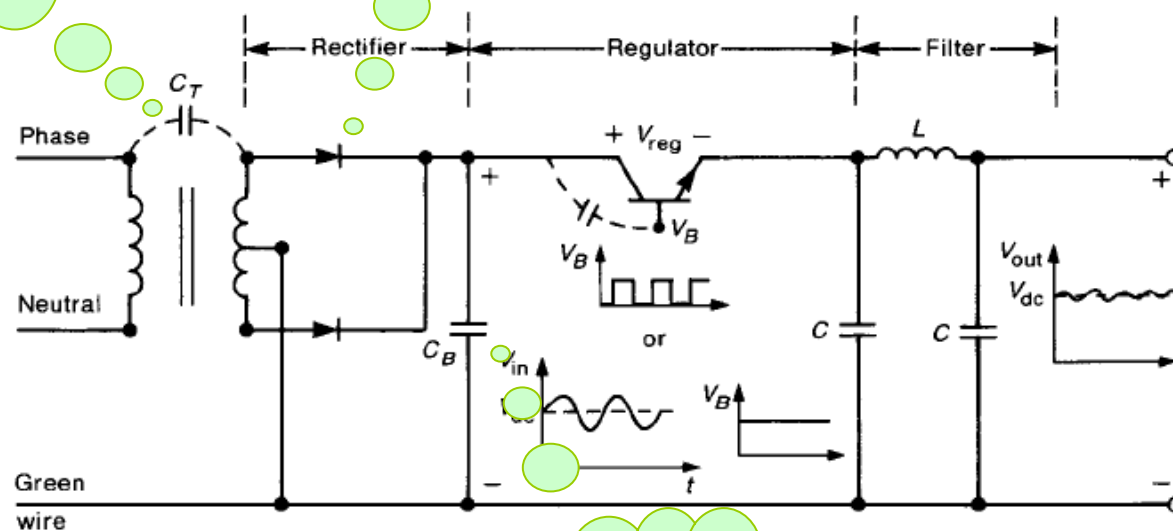
Il regolatore fa sì che la tensione resti costante al variare del carico, realizzando un resistore di resistenza variabile grazie a un feedback sulla tensione  $V_{out}$



## Alimentatori Lineari

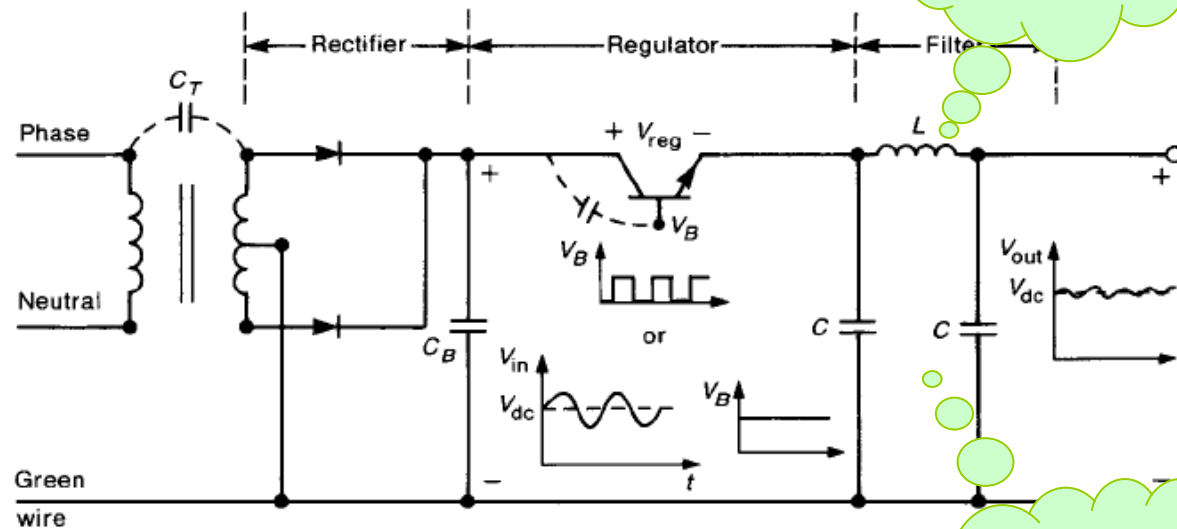
Trasformatore  
in ingresso.  
Trasla il  
livello di  
tensione

Ponte a diodi  
Che rettifica  
entrambe le  
semionde



Bulk capacity  
per rendere  
"continua" la  
tensione  
raddrizzata

## Alimentatori Lineari



Filtro passa-basso per ridurre il ripple su  $V_{dc}$

La frequenza di cutoff di questo filtro deve essere intorno ai 50Hz

# Compatibilità Elettromagnetica II A. A. 2008-09

S. Selleri - Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni – Università di Firenze

The diagram illustrates a voltage regulator circuit. It starts with a transformer having a primary connected to 'Phase' and 'Neutral' lines, and a secondary with a center tap connected to 'Green wire'. The secondary terminals are connected to a bridge rectifier. A capacitor  $C_T$  is connected across the primary. The rectifier's output is connected to a filter capacitor  $C_B$ . The positive terminal of  $C_B$  is connected to the non-inverting input of an operational amplifier (op-amp) configured as a voltage follower. The op-amp's output, labeled  $V_{reg}$ , is connected to the wiper of a variable resistor  $R_T$ . One end of  $R_T$  is connected to the positive output terminal, and the other end is connected to the negative output terminal. A Zener diode  $Z$  is connected between the positive output terminal and the wiper of  $R_T$ . The output voltage  $V_{out}$  is taken from the positive output terminal. A load resistor  $R_L$  is connected between the positive and negative output terminals. A series inductor  $L$  is placed between the filter capacitor  $C_B$  and the output. The output is also connected to a load capacitor  $C$ . Waveforms are shown:  $V_{in}$  is a sine wave,  $V_{dc}$  is a square wave, and  $V_B$  is a square wave. The output voltage  $V_{out}$  is a regulated square wave.

Il transistor è pilotato in modo da fornire un resistore variabile su cui far cadere parte della tensione  
[REGOLAZIONE]

## Alimentatori Lineari

La tensione in uscita viene prelevata e mandata in retroazione al BJT.

Sul BJT cade una tensione  $V_{reg}$  dipendente dalla polarizzazione del transistor.

Se l'assorbimento del carico aumenta e di conseguenza la tensione cala, la retroazione fa sì che la conduzione del BJT sia aumentata e, di conseguenza  $V_{reg}$  sia ridotta.

Se invece l'assorbimento del carico diminuisce la tensione tende a salire e la retroazione abbassa la conduzione del BJT facendo di conseguenza salire  $V_{reg}$ .

Nel complesso

$$V_{out} = V_{in} - V_{reg}$$



## Alimentatori Lineari

La regolazione porta quindi ad avere una certa potenza dissipata sul BJT, cosa indesiderata.

L'alimentatore lineare necessita inoltre di un trasformatore che operi ai 50Hz della rete per fornire la tensione del valore desiderato, quindi un trasformatore ingombrante e poco efficiente.

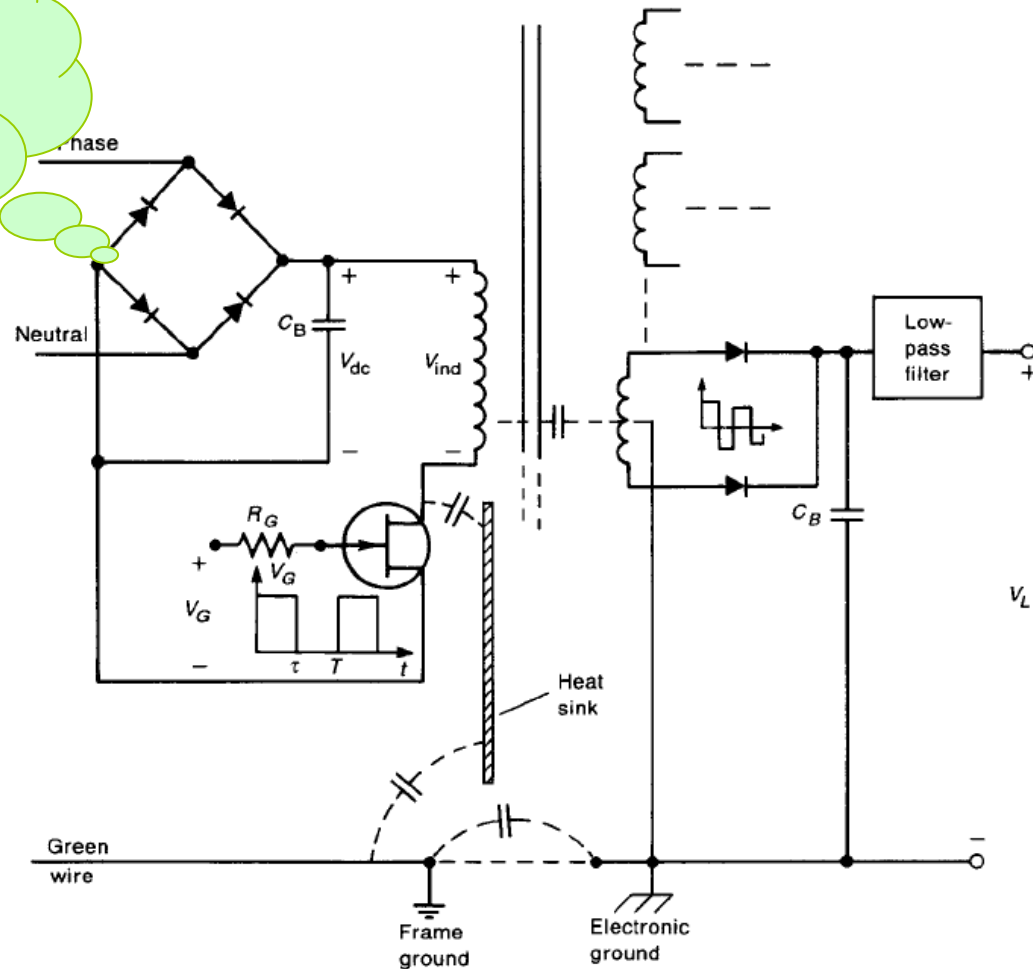
Tutto questo porta a efficienze di conversione alquanto basse, dell'ordine del 20-40 %.

Per quanto riguarda la compatibilità il problema risiede nelle armoniche generate dal raddrizzatore a diodi. Questo problema è marginale e, in effetti, l'alimentatore lineare è il meno rumoroso di tutti

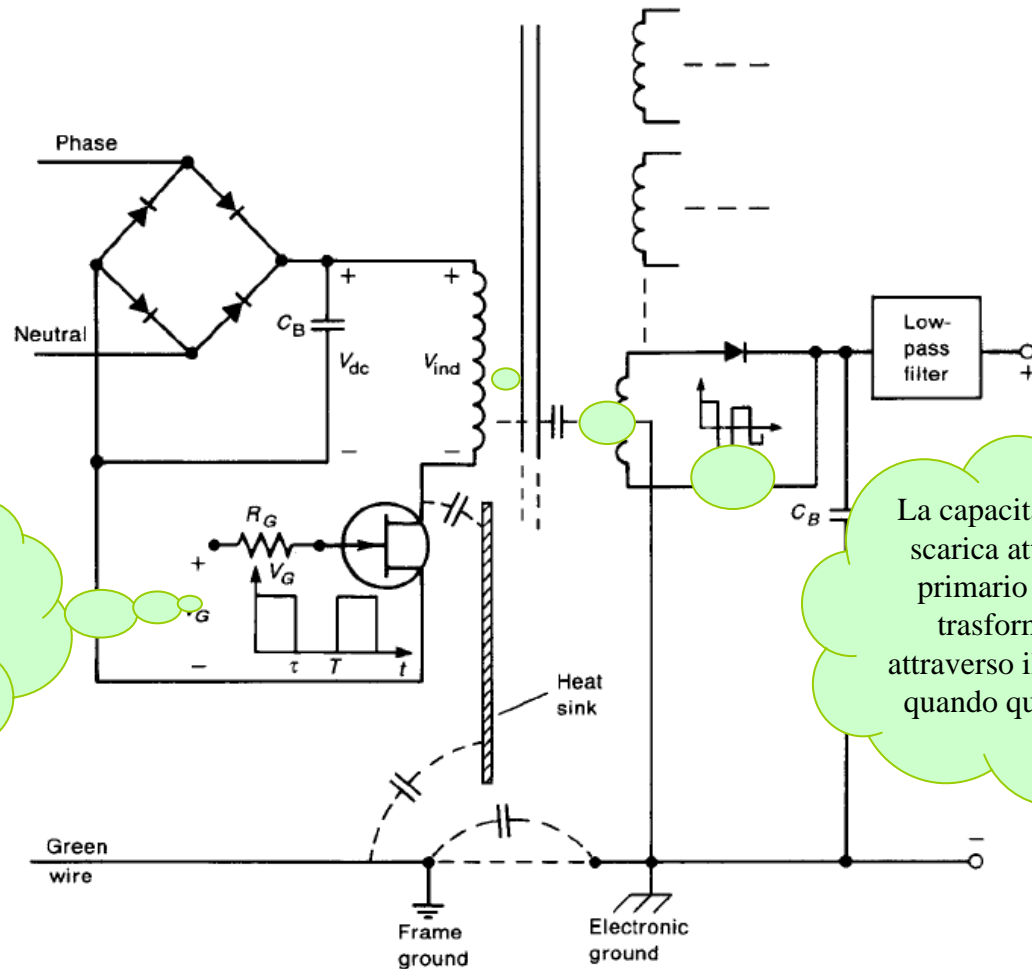
## Alimentatori Switching

Molto più efficienti (60-90%) e quindi molto più usati, sono gli alimentatori Switching

Un ponte a diodi  
seguito da un  
condensatore di bulk  
raddrizza la 220V



## Alimentatori Switching



Un generatore a onda quadra sul gate di un MOSFET apre e chiude quest'ultimo

La capacità di bulk si scarica attraverso il primario di questo trasformatore e attraverso il MOSFET, quando questo è ON

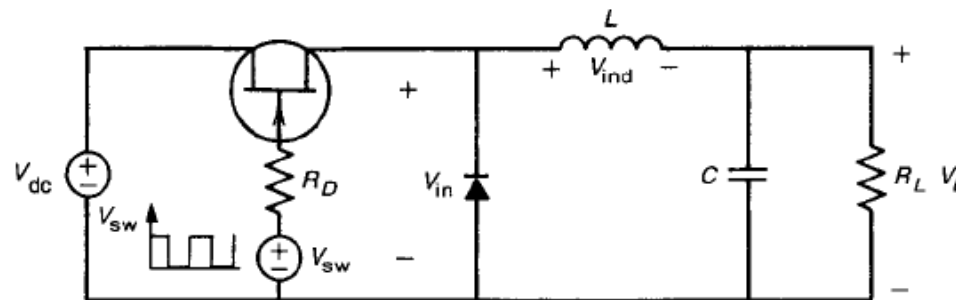
## Alimentatori Switching

L'onda quadra di switching è a 230-100kHz [Con pounte di 1MHz].

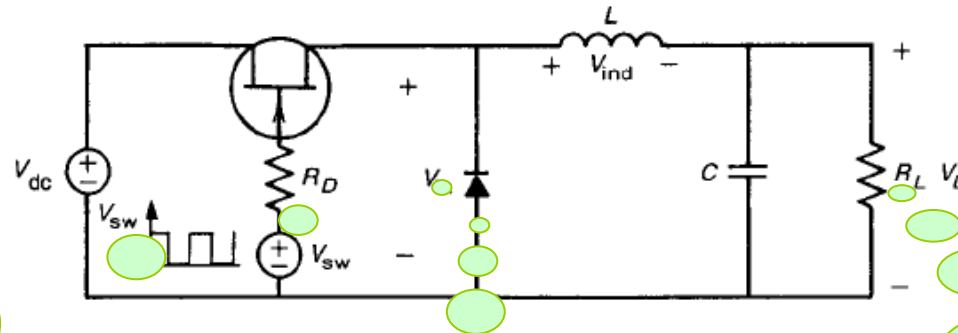
Questo permette di avere trasformatori molto più compatti e leggeri, con minori perdite.

L'onda quadra di controllo del MOSFET ha periodo  $T$  e larghezza di impulso  $\tau$ , con conseguentemente un duty cycle  $\tau/T$

Lo schema concettuale è il seguente



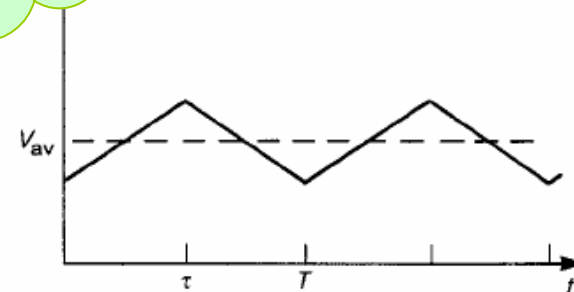
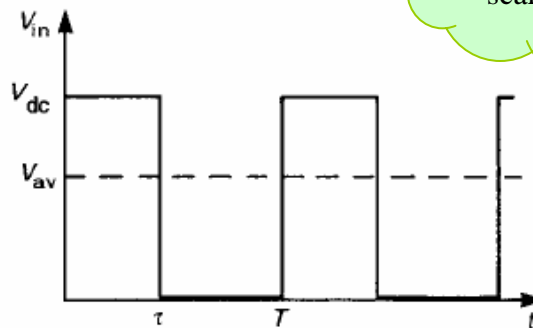
## Alimentatori Switching



Ai capi del diodo cade l'onda quadra, con un proprio duty cycle

Il diodo NON raddrizza ma consente la scarica di C

Il filtro passa basso riduce l'onda quadra a una continua con ripple intorno al valor medio



## Alimentatori Switching

Quando il MOSFET è ON il diodo è OFF e la tensione (continua è applicata al filtro, dove il condensatore si carica e l'induttanza immagazzina energia nel proprio flusso di induzione magnetica.

Quando il MOSFET è OFF la tensione ai capi dell'induttanza cambia segno, per la legge di Faraday, il diodo passa in ON e il condensatore e l'induttore si scaricano attraverso di esso.

Il risultato complessivo sul carico è un dente di sega intorno al valore di tensione media dato da

$$V_{av} = \frac{\tau}{T} V_{dc}$$

Questo consente di avere una tensione media desiderata semplicemente variando il *duty cycle* dell'onda quadra che pilota il MOSFET

Siccome il MOSFET è solo ON o OFF su di esso (teoricamente) non si dissipa potenza, a differenza del BJT del regolatore lineare.

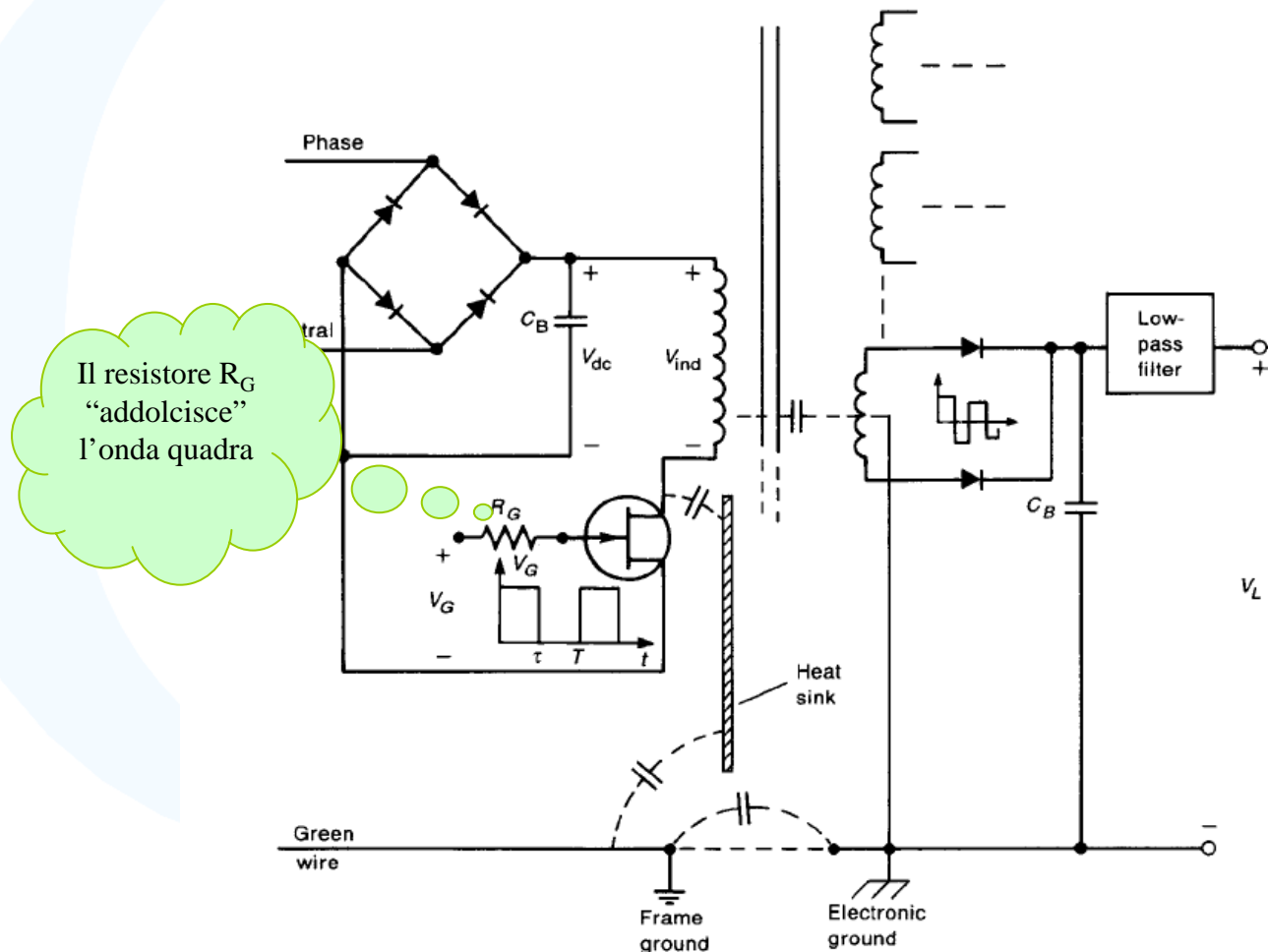
## Alimentatori Switching

Il generatore di onda quadra è del tipo a modulazione di larghezza d'impulso (*Pulse Width Modulator* PWM) ed è retroazionato sulla tensione d'uscita.

Se la tensione d'uscita cala perché l'assorbimento del carico aumenta allora il PWM aumenta il proprio duty cycle e viceversa.

## Alimentatori Switching

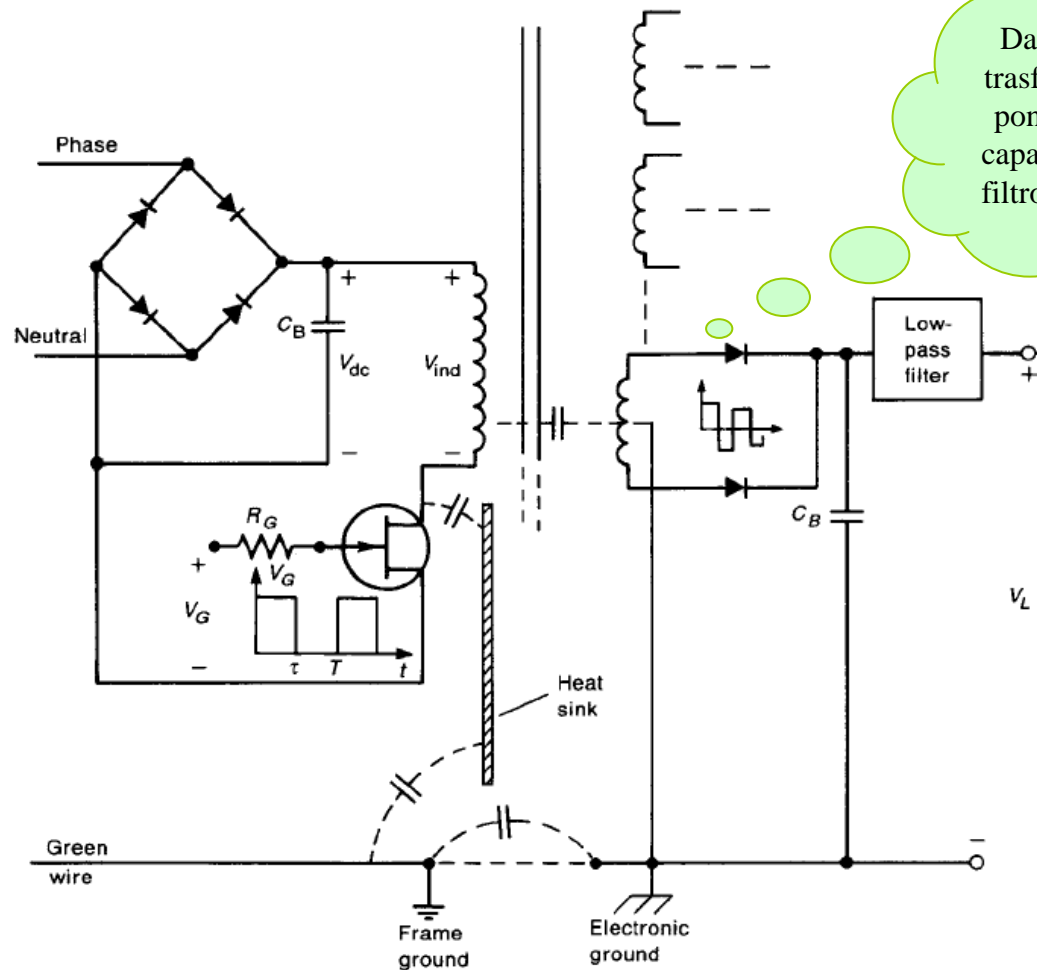
RG addolcisce l'onda quadra incrementando i tempi di salita e di discesa. Questo fa sì che il MOSFET sia in regione attiva per un certo periodo [*male! dissipa!*] e, di conseguenza, riduce il contenuto spettrale ad alta frequenza dell'onda quadra [*bene! minor rumore!*]





# Alimentatori Switching

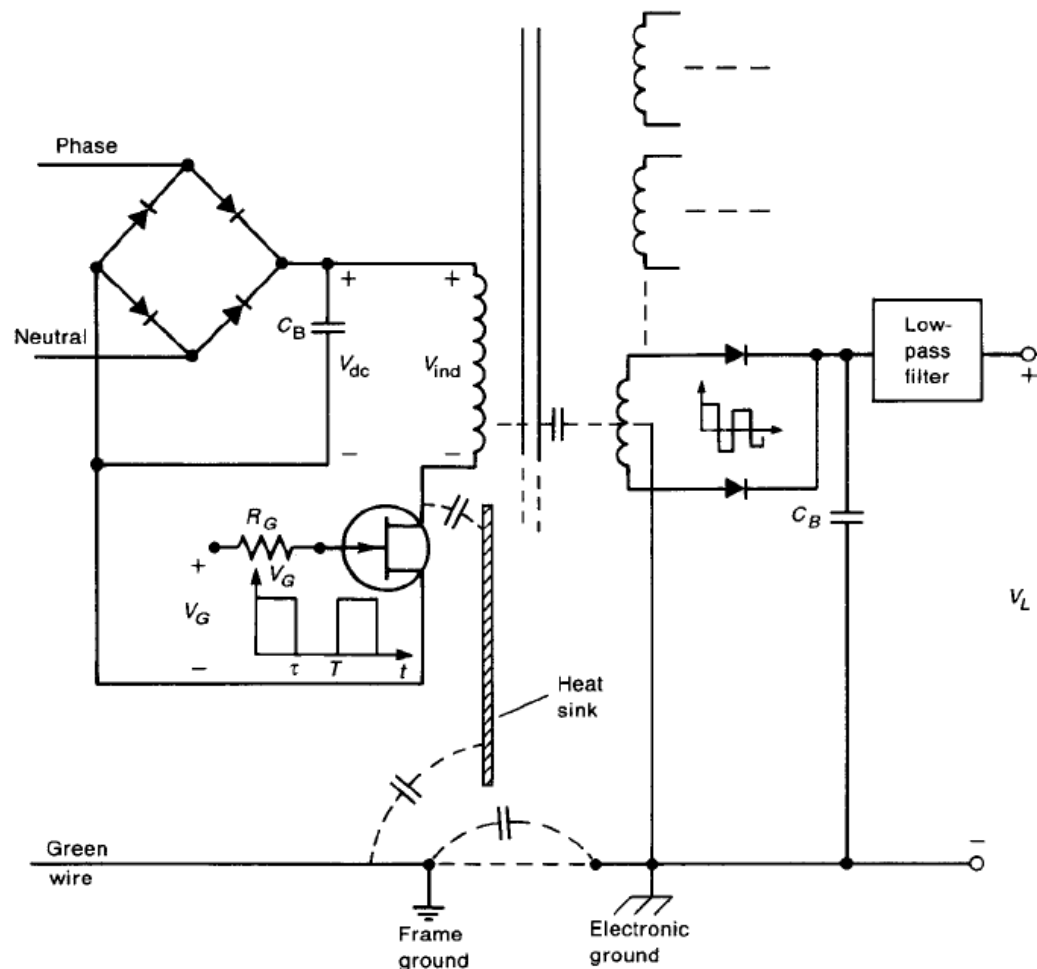
L'onda quadra sul secondario è bilanciata (nel caso di connessione in figura) e può essere facilmente raddrizzata con un ponte a diodi.



Dall'altro lato del trasformatore c'è un ponte di diodi, una capacità di bulk e un filtro per raddrizzare il tutto

## Alimentatori Switching

È interessante notare come negli alimentatori moderni si possano inserire più avvolgimenti secondari, con diverso numero di spire, per ottenere diverse tensioni continue (+ e - 12V, + e - 5 V etc. etc.)





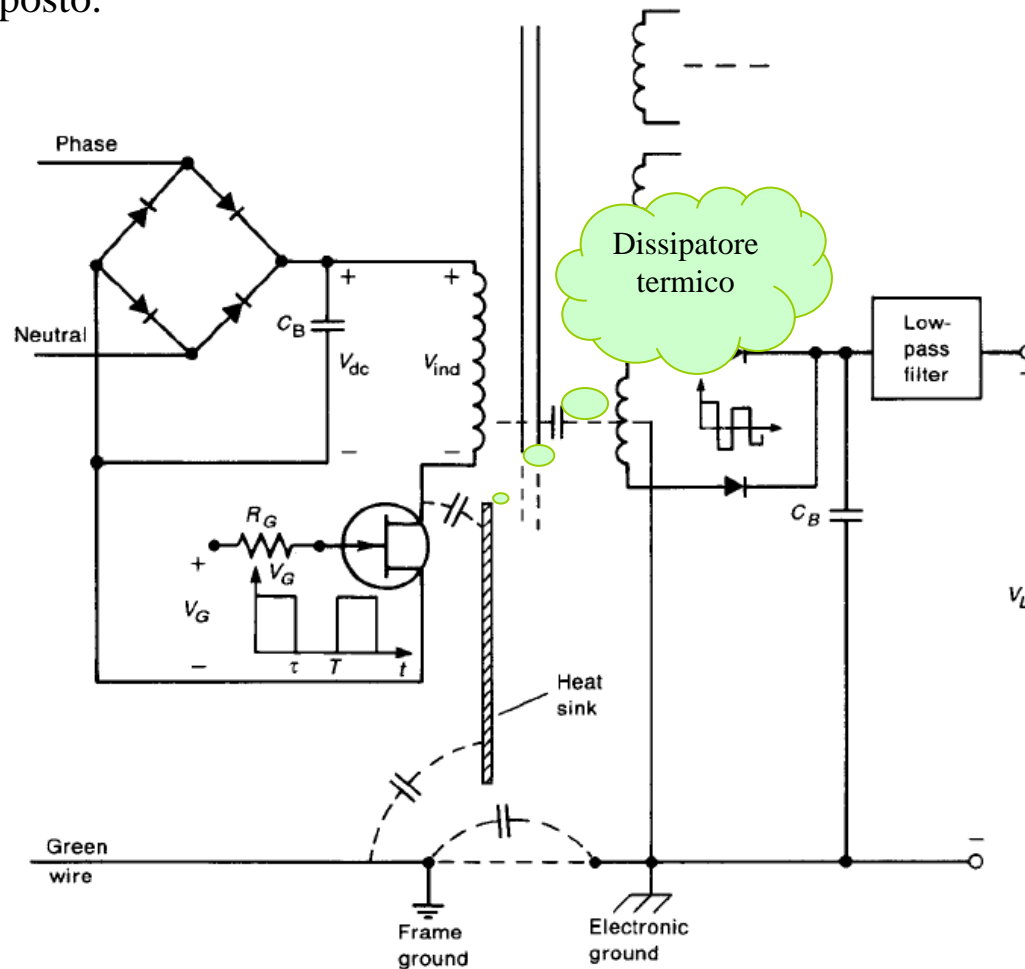
## Alimentatori Switching

In questo approccio la regolazione di tensione, che è fatta sul primario del trasformatore, ha effetto su tutti i secondari nello stesso modo.

È però anche possibile inserire lo switching sul (sui) secondari per regolazioni separate.

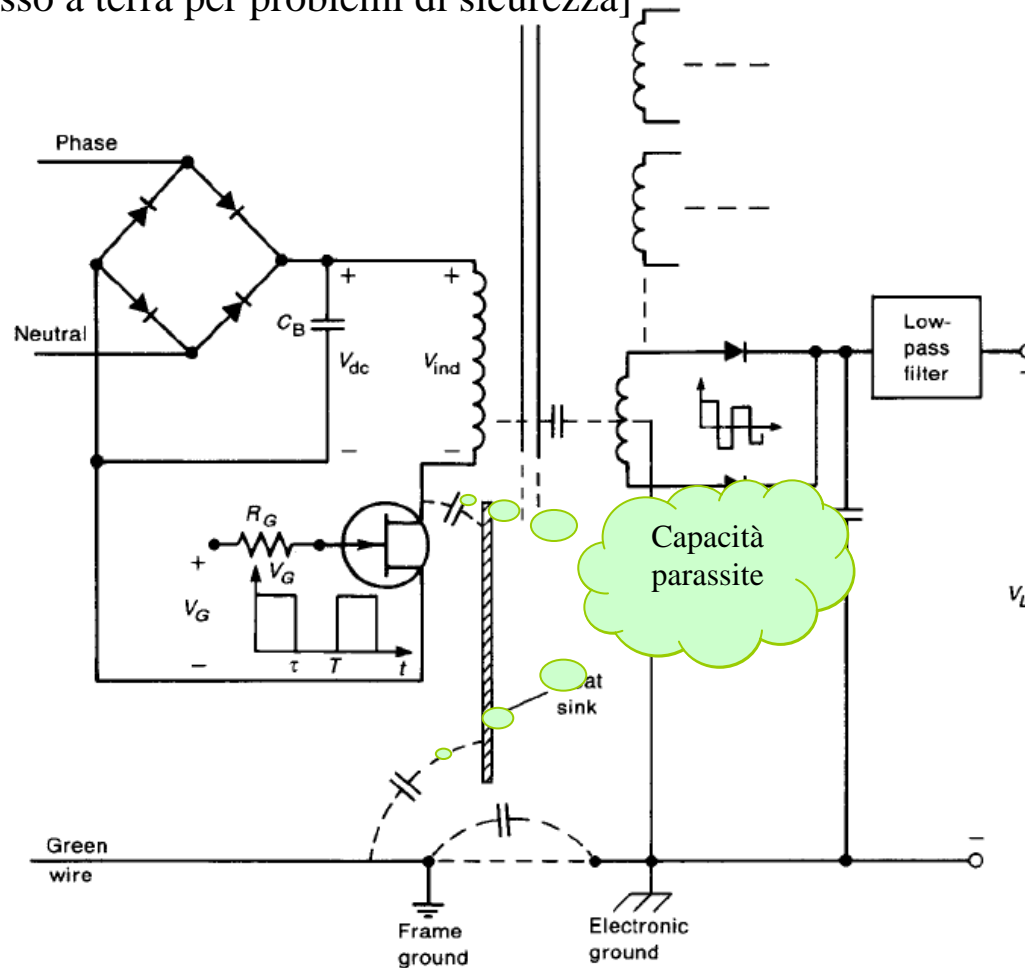
## Alimentatori Switching

Nonostante le alte efficienze l'alimentatore scalda. Vi è un *dissipatore* metallico collegato al MOSFET. Il dissipatore è in contatto col MOSFET ma non in contatto elettrico, vi è dell'isolante interposto.



## Alimentatori Switching

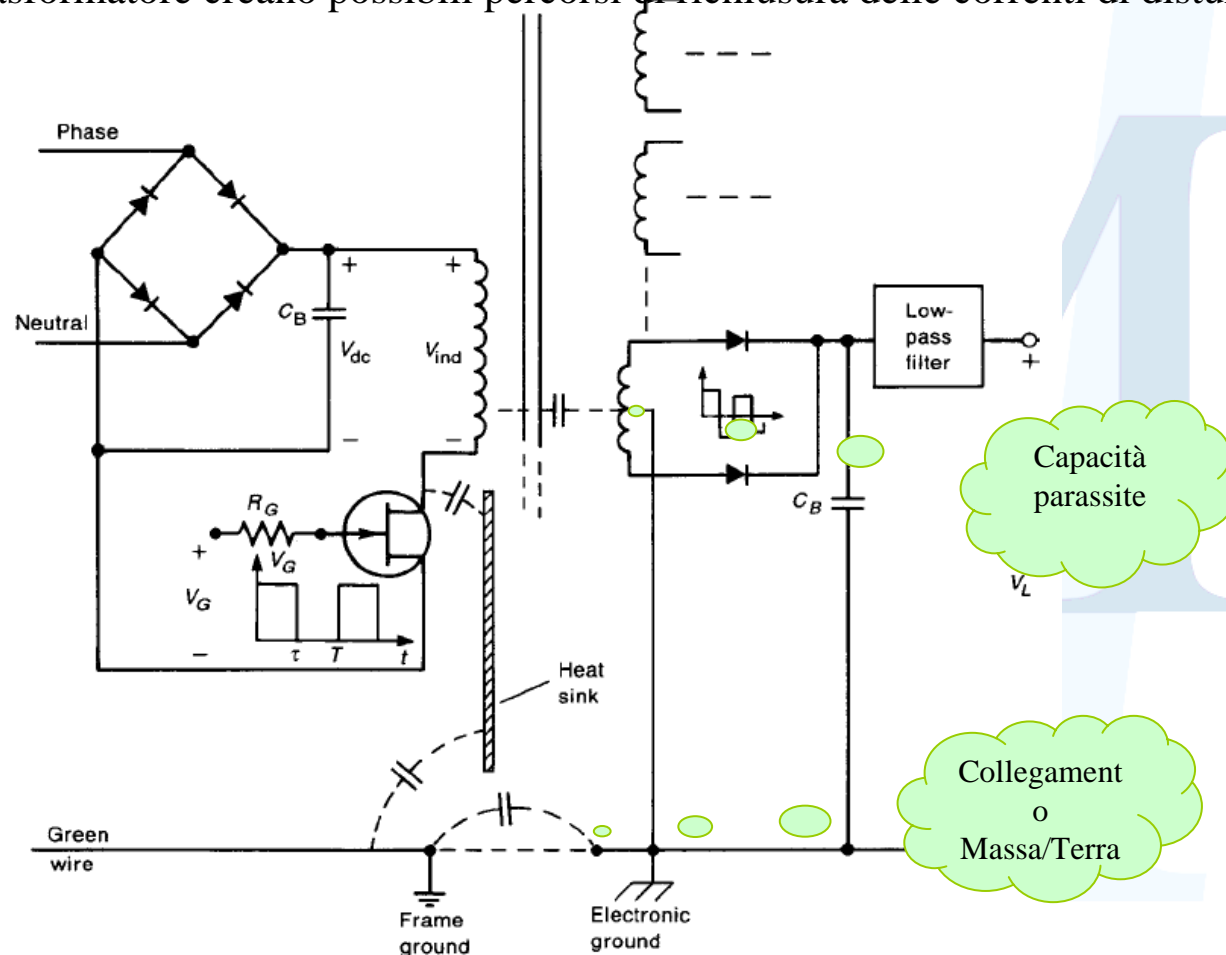
Questo crea una capacità parassita fra MOSFET e dissipatore. Se il dissipatore è vicino al case vi è anche una capacità verso di esso e quindi verso il filo di terra [il dissipatore potrebbe perfino essere messo a terra per problemi di sicurezza]



## Alimentatori Switching

Le capacità parassite creano un percorso per i disturbi di modo comune.

Analogamente, le capacità parassite fra massa elettronica e terra, così come fra primario e secondario del trasformatore creano possibili percorsi di richiusura delle correnti di disturbo



## Alimentatori Switching

Nell'alimentatore switching caso però oltre alle armoniche dei 50Hz dell'alimentazione legate al primo ponte a diodi vi sono anche tutte le armoniche generate dal MOFSET che effettua lo switching e dai diodi sul secondario.

Queste armoniche non sono filtrate in alcun modo perché non vi è il trasformatore a 50Hz dell'alimentatore lineare.

Siccome, come già ripetuto più volte, il modo più efficiente di bloccare i disturbi è di non produrli, analizziamo un po' di effetti dei componenti.



## Alimentatori Switching

La resistenza  $R_G$  sul gate del MOSFET è un primo parametro di cui si è già discusso. Più è elevata e più è elevato il tempo di salita/discesa dell'onda quadra, diminuendo di conseguenza le armoniche a frequenza maggiore.

Un'altra fonte di rumore notevole che si può tenere sotto controllo è costituita dai diodi dei ponti rettificatori, e particolarmente quelli del segnale switchato presenti sul secondario.

Se il diodo è polarizzato direttamente c'è una certa quantità di carica immagazzinata alla giunzione. Quando la tensione si inverte e il diodo passa nello stato OFF la giunzione deve essere svuotata da queste cariche.

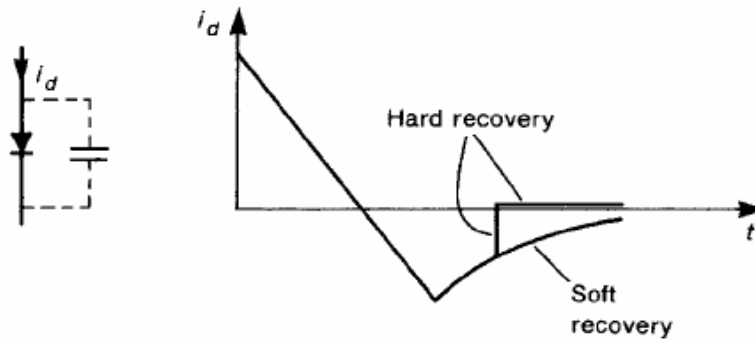
La rimozione di questa carica fa sì che la corrente non vada a zero ma passi per zero per poi cambiare segno per un breve periodo



## Alimentatori Switching

Siccome spesso questa corrente è indesiderata esistono diodi *hard recovery* progettati in modo da far terminare il più rapidamente possibile questa corrente negativa.

Altri diodi invece hanno un *soft recovery*, dove questa corrente decade dolcemente.

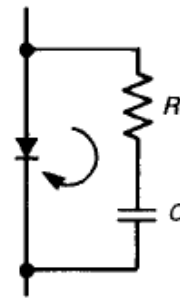


Evidentemente i diodi del primo tipo hanno una corrente con contenuti spettrali alle alte frequenze più elevati e sono quindi *più rumorosi* ma sono più efficienti dal punto di vista del funzionamento.

Ci troviamo di nuovo di fronte a un trade-off.

## Alimentatori Switching

Per migliorare il comportamento EMC/EMI e ridurre il rumore si può abbassare la corrente negativa inserendo in parallelo al diodo un circuito RC



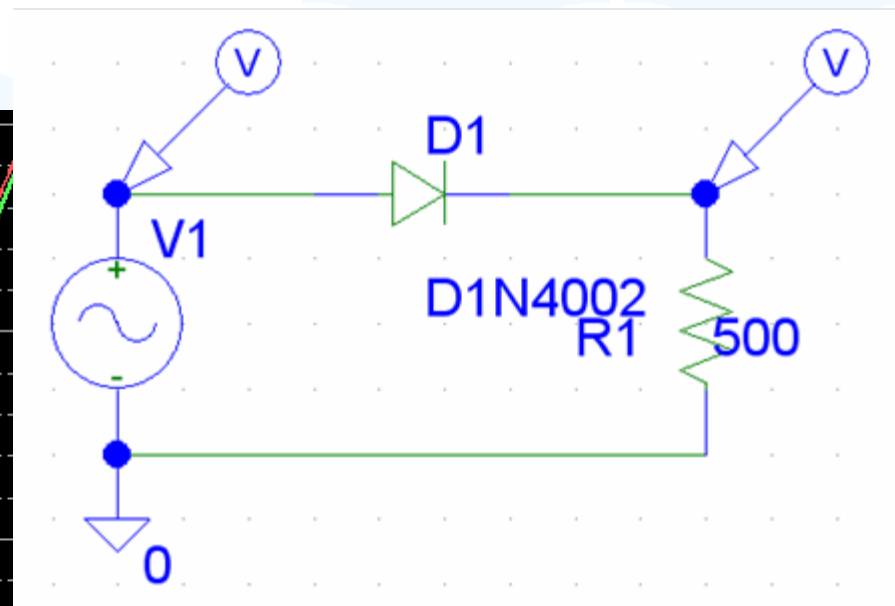
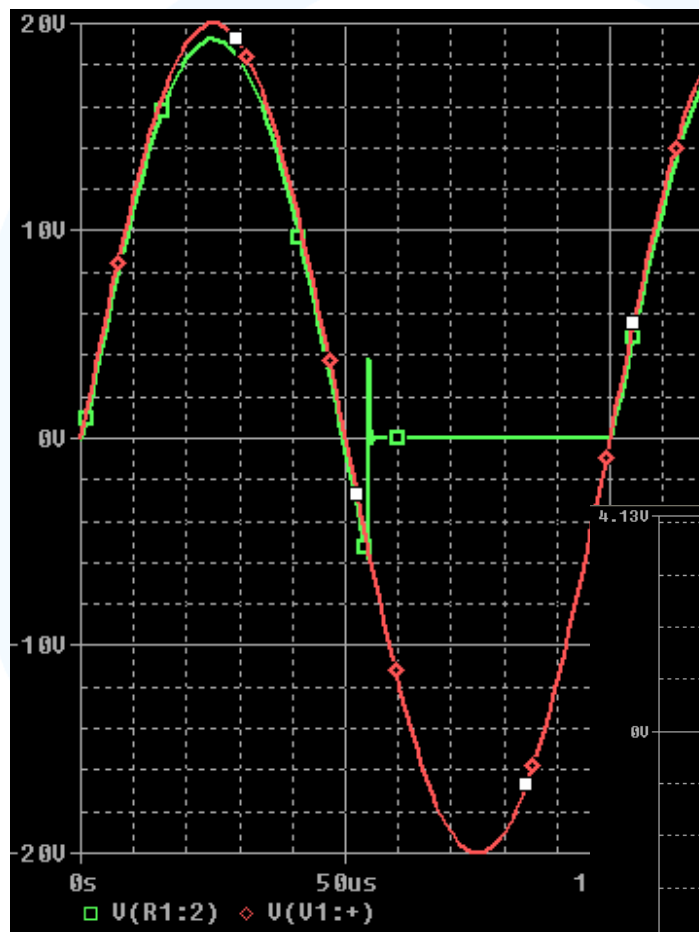
Questo circuito, detto *snubber fornisce* un cammino di scarica per la capacità del diodo quando questo va in fase di off.

Questo addolcisce l'andamento delle correnti in generale, riducendone le componenti ad alta frequenza.

Siccome però le armoniche ad alta frequenza circolano nella maglia così creata questa deve essere di area minore possibile per contenere le emissioni radiate.

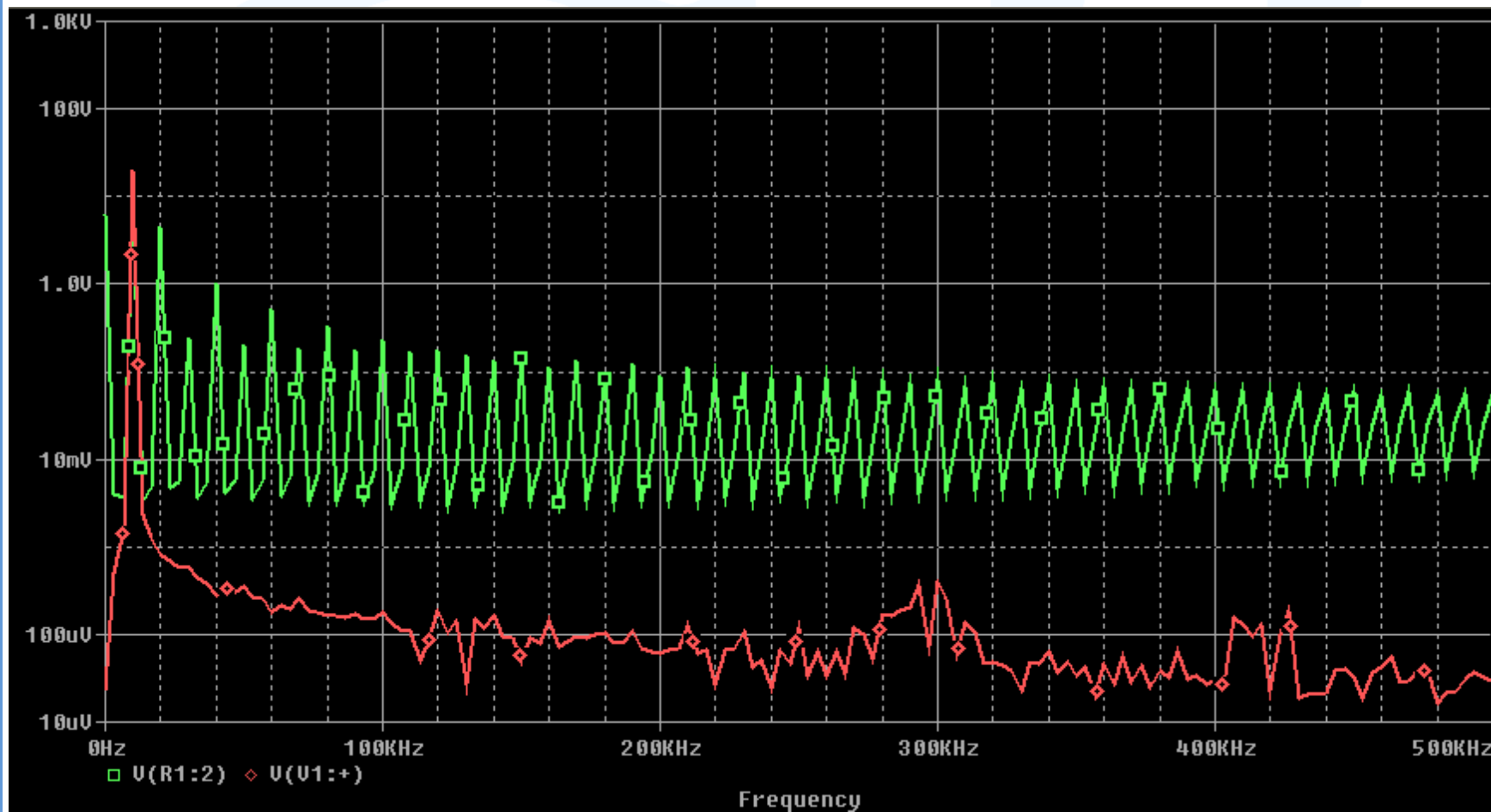
## Alimentatori Switching

Senza Snubber...



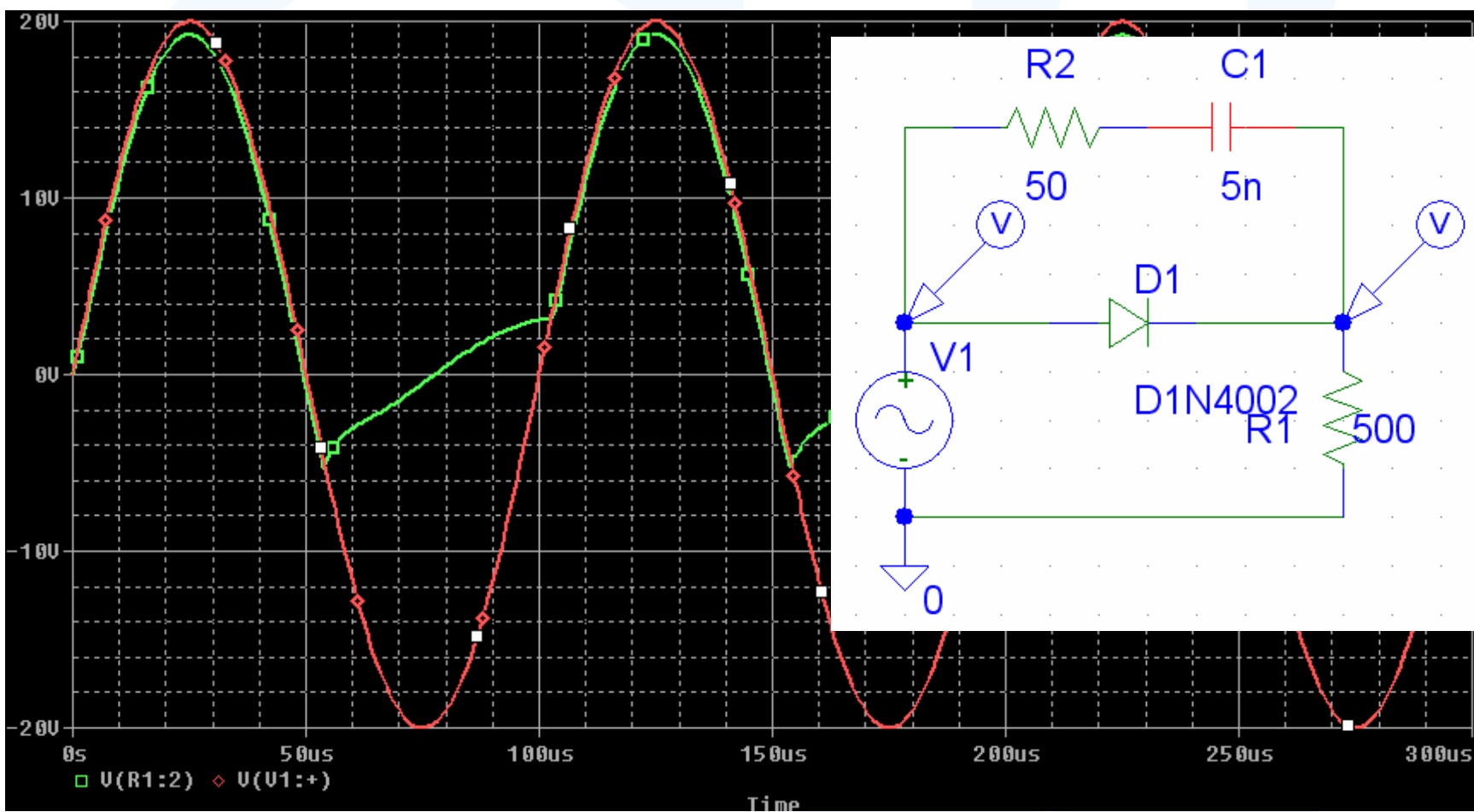
## Alimentatori Switching

Senza Snubber... in frequenza



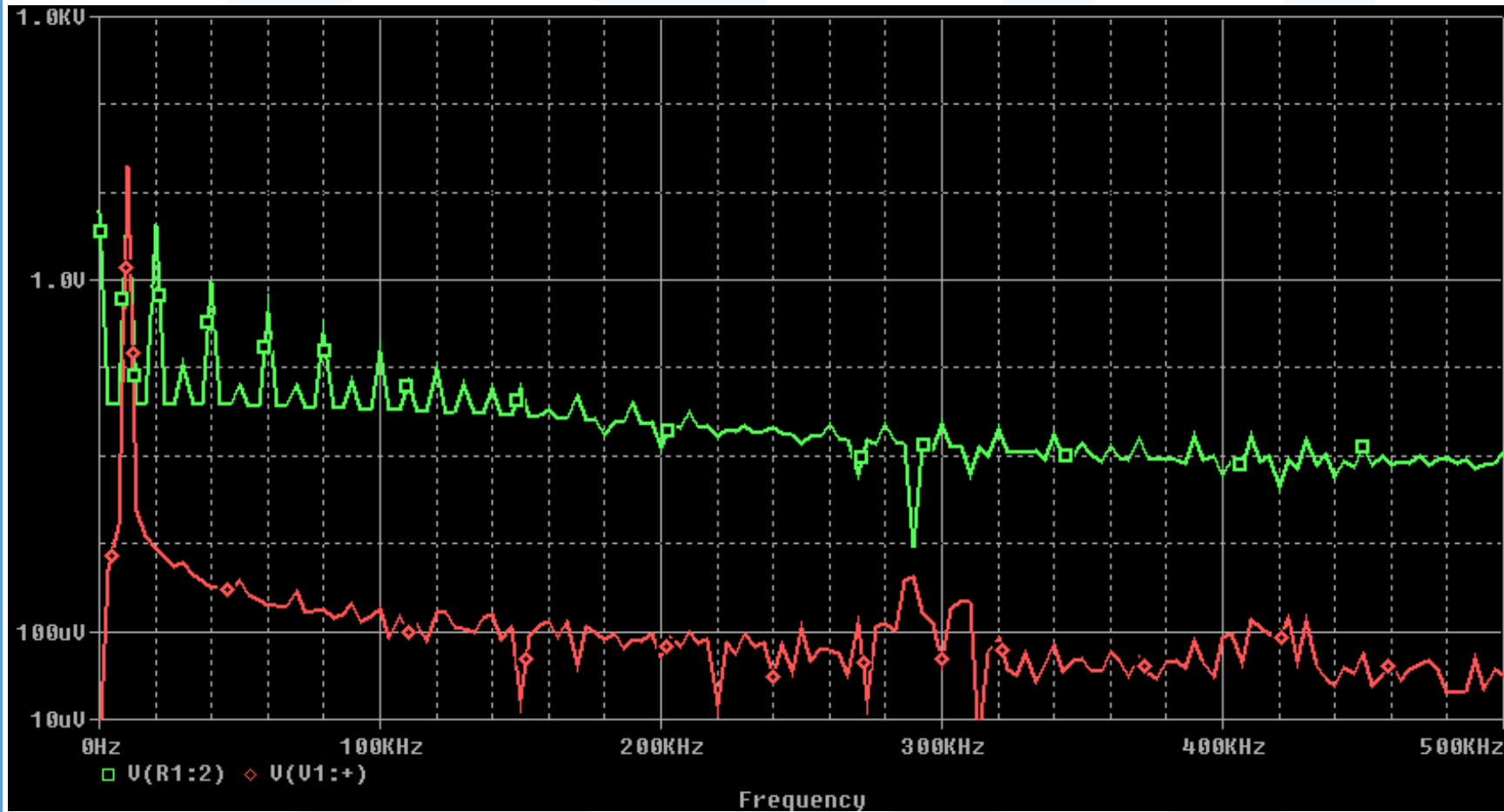
# Alimentatori Switching

Con Snubber...



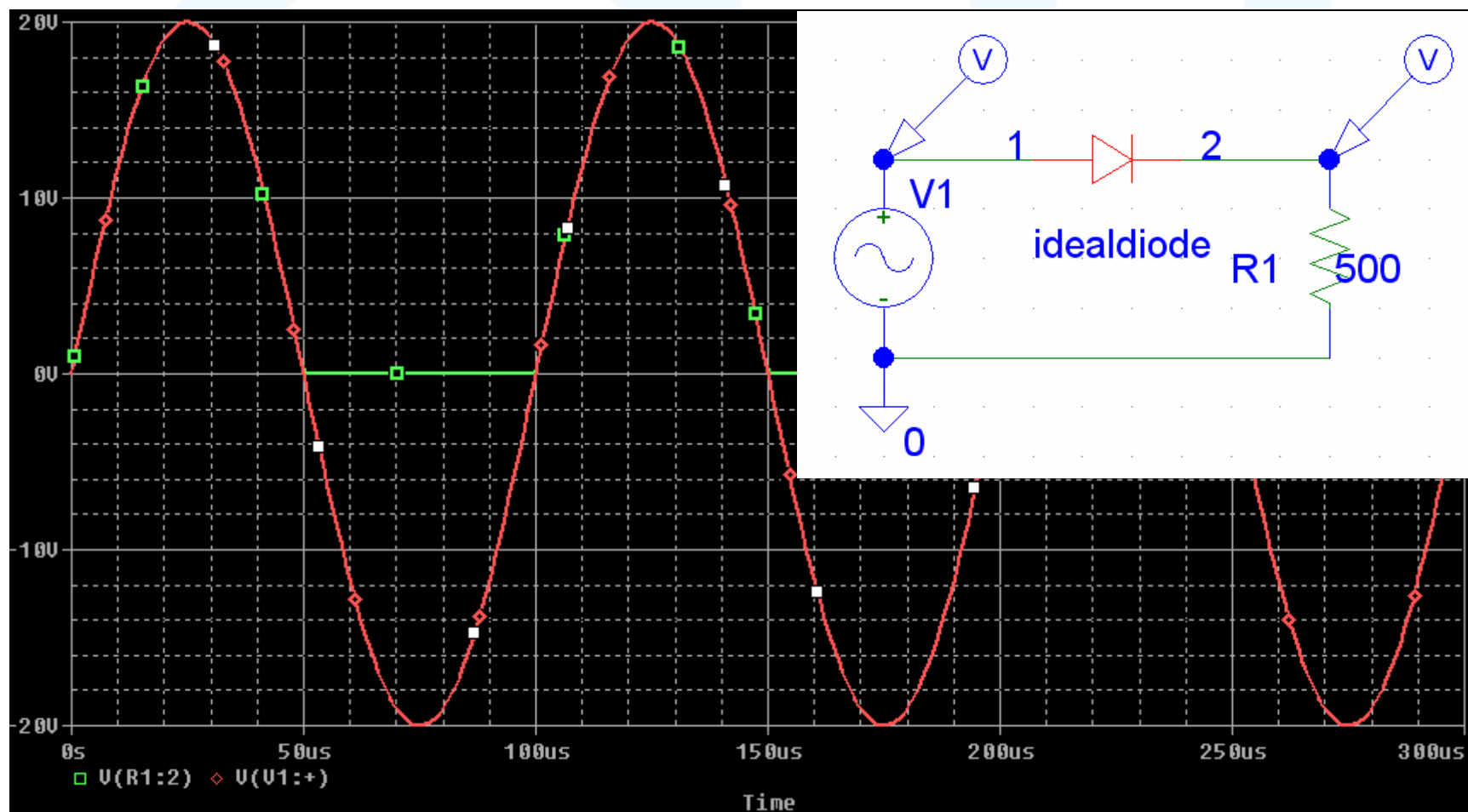
## Alimentatori Switching

Con Snubber... in frequenza



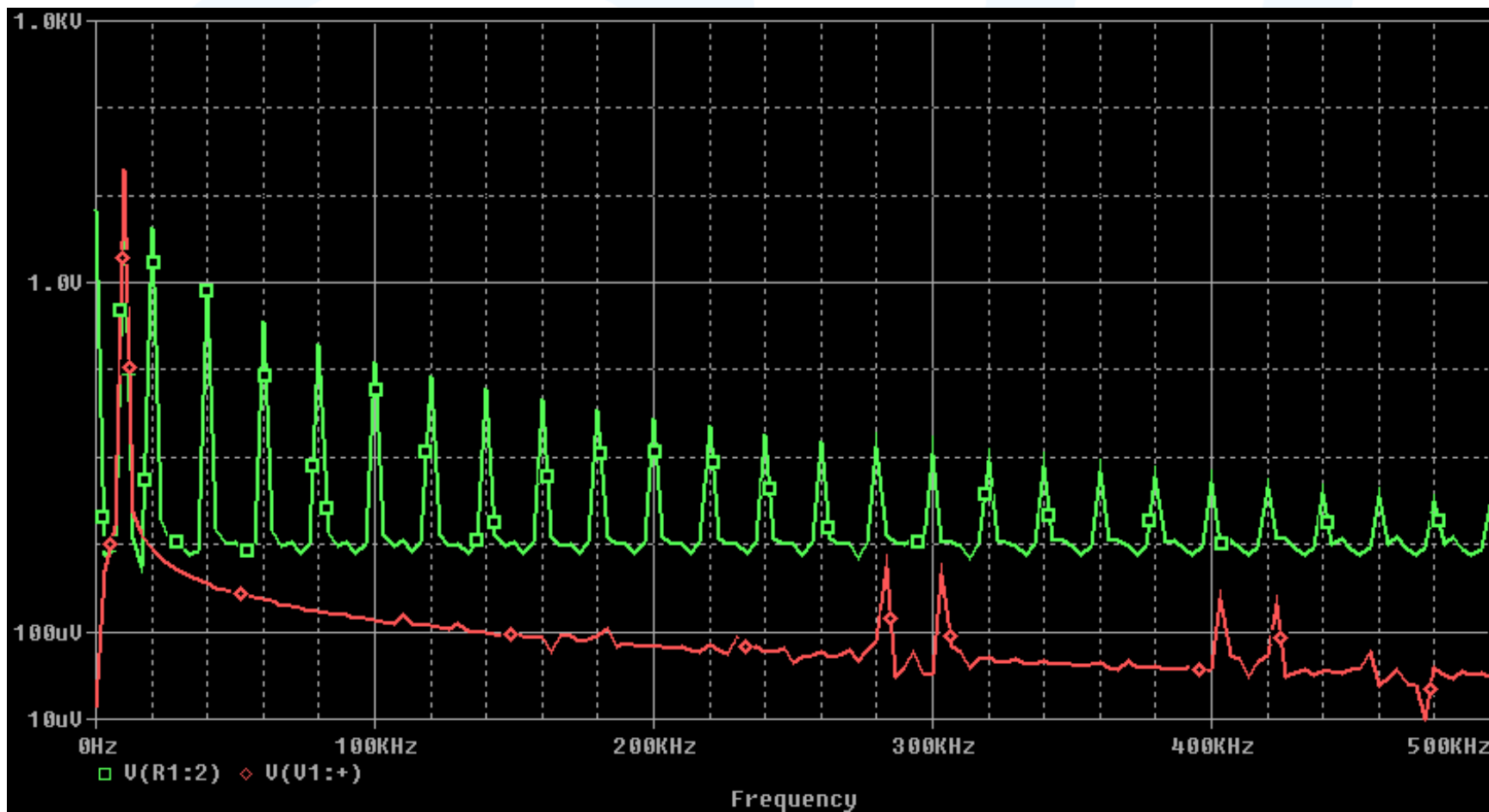
## Alimentatori Switching

Se vi sembra rumoroso, pensate al diodo ideale



## Alimentatori Switching

Se vi sembra rumoroso, pensate al diodo ideale... in frequenza!





## Alimentatori Switching

Il trasformatore vero e proprio è costituito da un avvolgimento primario e uno o più secondari su un nucleo di materiale ferromagnetico.

Il trasformatore a 50Hz è grosso, pesante e perde molto per le correnti (*eddy currents*) indotte nel nucleo di metallo.

Al crescere di  $f$  le perdite delle eddy currents calano, i trasformatori possono essere costruiti più piccoli ed efficienti.

Il materiale ferromagnetico fornisce un percorso a bassa riluttanza per le linee di induzione magnetica. Tutte le linee di flusso generate dal primario tendono quindi a concatenarsi col secondario e il rapporto di trasformazione è

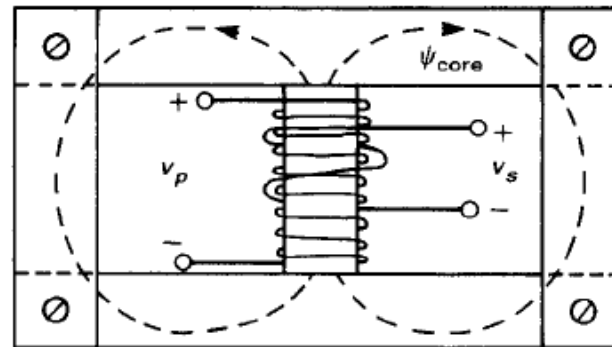
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

## Alimentatori Switching

Il trasformatore a 50Hz è solitamente composto da avvolgimenti intorno a un nucleo ad “I” in acciaio laminato (per contrastare l’insorgenza delle eddy currents)

I due avvolgimenti sono uno sopra all’altro sul nucleo.

Il percorso del flusso è quindi chiuso con due tratti verticali ancora in acciaio laminato.



## Alimentatori Switching

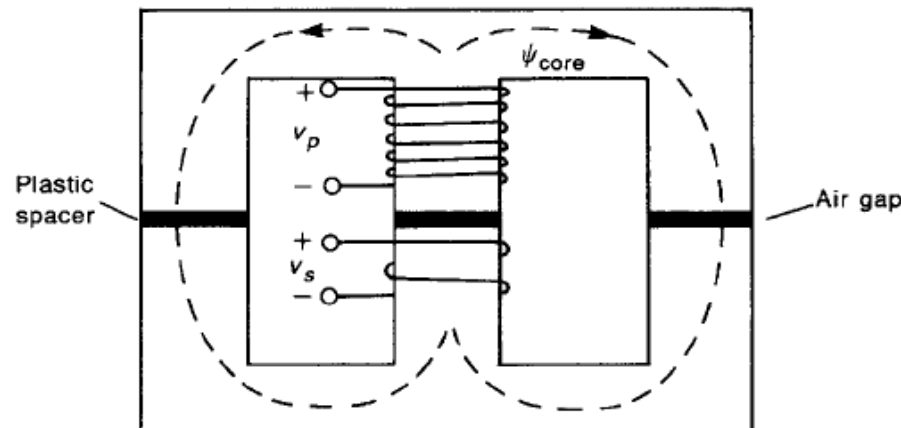
Per trasformatori ad alta frequenza il nucleo è tipicamente di ferrite e costruito in due metà a forma di “E” su ciascuna delle quali c’è uno dei due avvolgimenti.

Le due “E” sono poi assemblate come in figura per chiudere il cammino

I core di ferrite sono però soggetti a *saturazione* se l’intensità del flusso è troppo elevata, con conseguenti perdite.

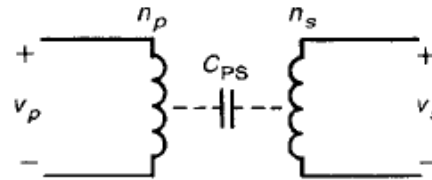
Per limitare la saturazione si può interrompere con uno spessore di plastica calibrato il circuito magnetico. Questo equivale a introdurre un tratto a alta riluttanza che diminuisce il flusso e quindi rende più difficile che la ferrite si saturi

Sfortunatamente questo causa forti campi magnetici nel gap, campi che possono radiare e quindi possono portare a interferenza radiata alle armoniche della forma d’onda di switching



## Alimentatori Switching

La vicinanza dei due avvolgimenti, soprattutto nel caso in cui siano sovrapposti crea una capacità parassita e un percorso a bassa impedenza per i disturbi



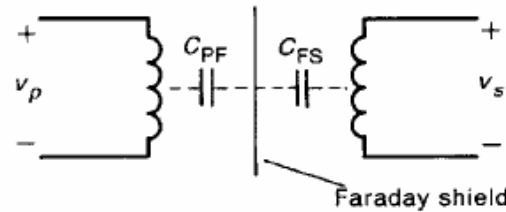
In questo modo i disturbi a alta frequenza sul secondario possono facilmente accoppiarsi col primario e uscire come disturbi condotti sul cavo di alimentazione.

Evidentemente questo accoppiamento è tanto migliore quanto più alta è la frequenza del segnale.

In pratica un clock digitale (tipicamente più di 10MHz) è più critico delle armoniche dell'alimentatore switching.

## Alimentatori Switching

La soluzione sta nell'inserire uno schermo metallico (gabbia di Faraday) Tra gli avvolgimenti

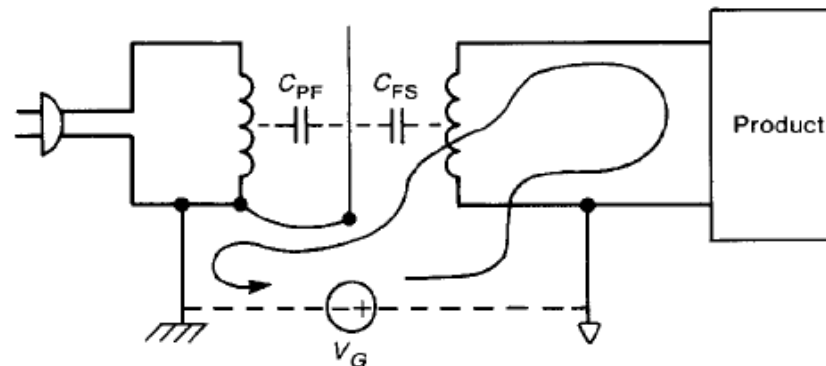


Lo schermo trasforma la capacità in due capacità in serie... potenzialmente maggiori dell'originale. Ancora manca qualcosa, ovvero la messa a massa dello schermo.

Il problema è se metterlo a massa dalla parte del primario, o metterlo a massa dalla parte del secondario

La decisione dipende da dove vogliamo lasciar fluire le correnti di disturbo...

## Alimentatori Switching

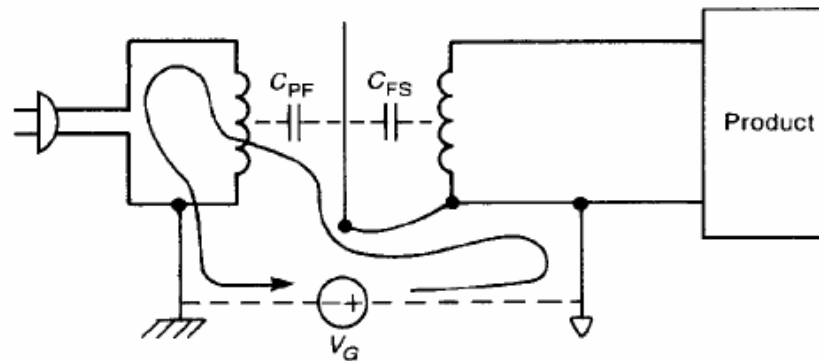


Se colleghiamo lo schermo al primario abbiamo che l'eventuale disturbo modellato come una differenza di potenziale fra le masse del primario e dell'elettronica trova un percorso attraverso la capacità  $C_{FS}$  e lo schermo

Questo percorso interessa l'elettronica ma non l'alimentazione, e quindi non viene rilevato dal LINS e strumenti correlati

Questa è la *situazione migliore*.

## Alimentatori Switching



Se invece il collegamento è fatto fra lo schermo e la massa del circuito il percorso di richiusura dei disturbi passa per  $C_{PF}$  e lo schermo

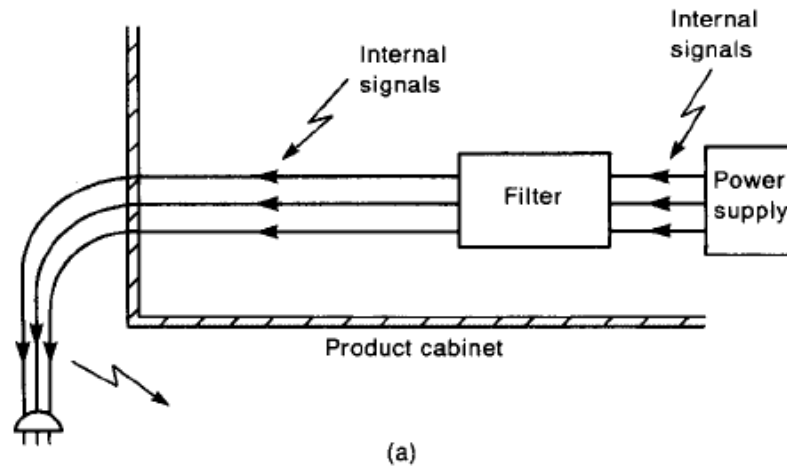
Questo percorso interessa l'alimentazione e non l'elettronica, e quindi *viene* rilevato dal LINS e strumenti correlati

Questa è la *situazione peggiore*.

## Alimentatori Switching

Infine c'è anche da considerare che il percorso dei cablaggi interni può avere un effetto

**Errato**



**Corretto**

