

INTRODUZIONE ALLA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA

Prof. Simone CASTELLAN

- [1] R.Redl, *Power electronics and electromagnetic compatibility*, in Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol.1, pp. 15-21, Baveno (Italy), 23-27 June 1996.
- [2] F. Costa, C. Gautier, E. Labouré, B. Revol, *Electromagnetic compatibility in power electronics*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2014.

DEFINIZIONI

Definizione di compatibilità elettromagnetica (EMC) secondo la norma CEI EN 61000-2:
capacità di un apparecchio o sistema di funzionare in modo soddisfacente nel suo ambiente elettromagnetico (aspetto riguardante l'immunità) senza introdurre disturbi elettromagnetici intollerabili per tutto quanto presente nell'ambiente stesso (aspetto riguardante le emissioni).

Ambiente elettromagnetico: la totalità dei fenomeni elettromagnetici che avvengono in un determinato luogo.

Disturbo elettromagnetico: ogni fenomeno elettromagnetico che può causare il degrado delle funzionalità di un dispositivo, un'apparecchiatura o un sistema.

Interferenza elettromagnetica (EMI): degrado delle funzionalità di un dispositivo, un'apparecchiatura o un sistema causato da un disturbo elettromagnetico.

Interferenza a radio frequenza (RFI): degrado della ricezione di un segnale voluto causato da un disturbo elettromagnetico avente componenti nell'intervallo delle radio frequenze.

Suscettibilità elettromagnetica: incapacità di un dispositivo, un'apparecchiatura o un sistema di non degradare le proprie prestazioni in presenza di un disturbo elettromagnetico; la suscettibilità è la *manca*za di immunità.

Qualità dell'alimentazione (power quality): indica quanto strettamente la tensione di rete si avvicina al caso ideale di sorgente stabile (sia nella forma d'onda che nella frequenza), affidabile, non affetta da distorsione e priva di disturbi. Riguarda un sottoinsieme della compatibilità elettromagnetica limitata a disturbi condotti in bassa frequenza.

ASPETTI DELLA EMC

Criteria da soddisfare

- Emissioni** = non emettere disturbi che causino interferenze con altri sistemi
- Immunità** = non essere suscettibili ai disturbi emessi da altri sistemi
- Compatibilità interna** = non causare interferenze con se stesso

Sorgenti di disturbi elettromagnetici (EM)

naturali: fulmini e fenomeni cosmici.

artificiali intenzionali: emissioni radio televisive, ponti radio, telefonia cellulare, sistemi di radionavigazione e radar, ecc.

artificiali non intenzionali:

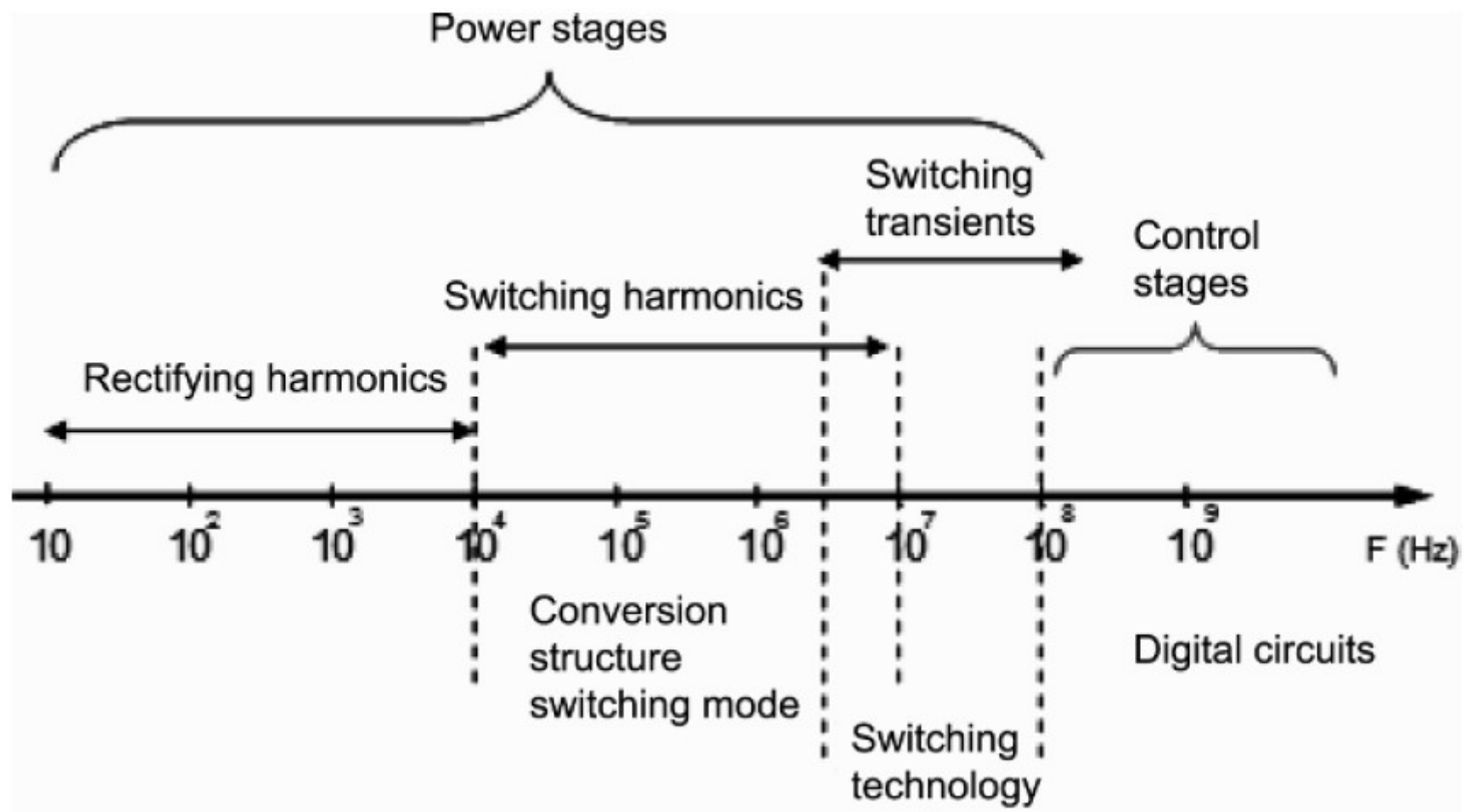
- a) accidentali: cortocircuiti, scariche elettrostatiche, intervento di protezioni (scaricatori e interruttori);
- b) permanenti: dovuti al funzionamento normale di 1) apparati industriali, scientifici e medici (carichi non lineari e tempo-varianti, sorgenti elettromagnetiche ad alta frequenza utilizzate per scopi diagnostici e terapeutici), 2) elettrodomestici e lampade a scarica e fluorescenti, 3) sistemi elettrici (transitori dovuti ad esempio ad inserzione e disinserzione di carichi, apertura e chiusura di interruttori).

Vie di propagazione dei disturbi elettromagnetici

- lungo i conduttori ($f < 10\text{MHz}$): disturbi condotti
- nello spazio libero ($f > 10\text{MHz}$): disturbi irradiati

INTERVALLO DI FREQUENZE DEI DISTURBI EM GENERATI DAI SISTEMI ELETTRONICI DI POTENZA

I convertitori statici con i loro sistemi di controllo possono generare disturbi condotti e irradiati che coprono un ampio spettro di frequenze.



ACCOPPIAMENTO DEI DISTURBI EM



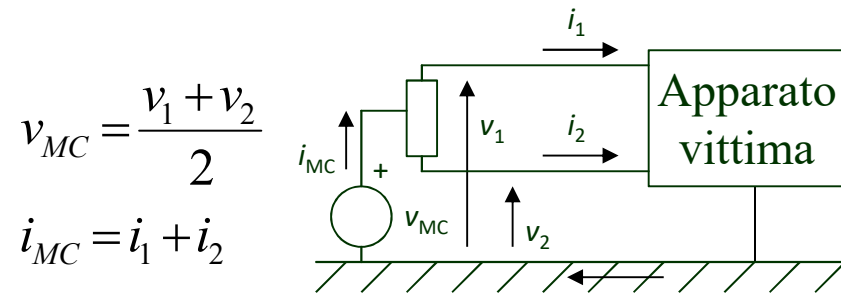
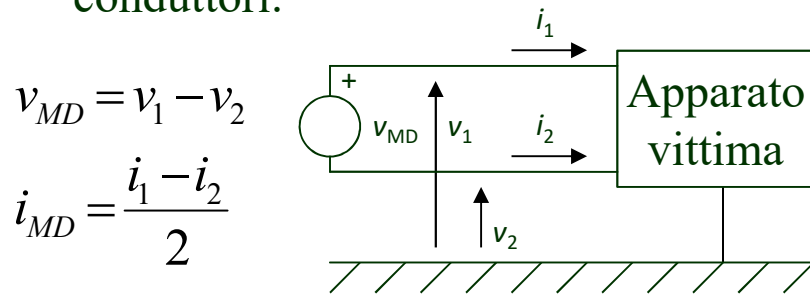
Si possono individuare tre meccanismi fondamentali di accoppiamento dei disturbi EM.

- 1) **Accoppiamento conduttivo per mezzo di conduttori:** si verifica quando circuiti differenti usano linee comuni e quindi hanno impedenze in comune, ad esempio quando sistemi differenti sono alimentati dalla stessa sorgente. Questo è il meccanismo di accoppiamento per la maggior parte dei disturbi che peggiorano la power quality.
- 2) **Accoppiamento conduttivo per mezzo di campi EM a breve distanza:** si verifica quando si hanno due conduttori ad una distanza inferiore a metà della lunghezza d'onda. Può essere di due tipi:
 - a) **Capacitivo:** si verifica in presenza di un campo elettrico variabile a causa delle capacità parassite presenti fra due circuiti;
 - b) **Induttivo:** si verifica in presenza di un campo magnetico variabile a causa della mutua induttanza fra due circuiti.
- 3) **Accoppiamento per mezzo di campi EM a lunga distanza:** si verifica quando si hanno due conduttori ad una distanza molto superiore a metà della lunghezza d'onda. In elettronica di potenza questa modalità di propagazione è meno significativa.

ACCOPPIAMENTO DEI DISTURBI EM

Esistono due modalità di accoppiamento conduttivo (meccanismi di accoppiamento 1 e 2):

- 1) **modo differenziale**, ha luogo fra due conduttori che formano un circuito;
- 2) **modo comune**, ha luogo fra un gruppo di conduttori e la terra o un altro gruppo di conduttori.



La modalità di accoppiamento conduttivo è propria soprattutto dei **disturbi in bassa frequenza**, cioè armoniche di corrente assorbite da carichi non lineari, armoniche di tensione (causate dalle cadute sulle impedenze del sistema di distribuzione), interarmoniche di corrente, variazioni di frequenza, buchi di tensione (causati dall'inserzione di grossi carichi), sovratensioni transitorie (causate dalla disinserzione di grossi carichi), flicker.

Le modalità di accoppiamento per mezzo di campi elettromagnetici sono proprie dei **disturbi in alta frequenza**, generati soprattutto dalla commutazione di interruttori. Le emissioni più significative sono disturbi di modo comune, che si propagano per accoppiamento capacitivo e induttivo, dovuti alla commutazione periodica dei dispositivi nei convertitori a commutazione forzata. Fonte di disturbo sono anche le commutazioni degli interruttori elettromeccanici, caratterizzati da elevate correnti di spunto in chiusura ed estinzione dell'arco elettrico in apertura che sono fonte di emissione ad ampio spettro (10kHz-1GHz) che si propaga sia per conduzione che per irradiazione.

ACCOPPIAMENTO DEI DISTURBI EM

La porzione dello spettro di emissione a frequenza più elevata ($>10\text{MHz}$) si propaga principalmente con la **modalità di accoppiamento per mezzo di campi EM a lunga distanza**, ossia per **irradiazione**.

Tipiche sorgenti di campi elettromagnetici irradiati sono i trasmettitori radio e TV, i telefoni cellulari e ogni altro tipo di applicazione “wireless”. A queste si aggiungono le componenti in alta frequenza di segnali variabili rapidamente o transitori veloci (scariche elettrostatiche, sovratensioni transitorie, fulmini).

Se i disturbi nella rete di alimentazione o nella rete dati contengono componenti in alta frequenza, altri elementi dell’installazione possono agire da antenna e irradiare campi EM all’esterno oppure trasmettere campi EM dall’esterno dentro il sistema. Tutte le parti conduttive delle installazioni elettriche possono fungere da antenna, principalmente cavi e collegamenti dei circuiti stampati, aperture (soprattutto longitudinali) degli involucri metallici e delle cabine.

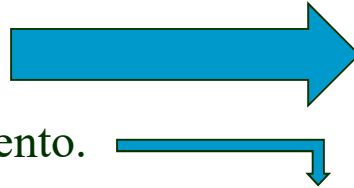
Cavi e aperture longitudinali iniziano a irradiare quando la loro dimensione lineare supera approssimativamente metà della lunghezza d’onda λ , legata alla sua frequenza f dalla relazione $\lambda=c/f$, dove c è la velocità della luce.

In pratica gli alloggiamenti delle apparecchiature non possono essere perfettamente chiusi. Aperture come ingressi dei cavi, fori di ventilazione, spazi attorno alle porte sono inevitabili. Queste aperture riducono l’efficacia della schermatura, il cui livello può però essere reso accettabile se si adottano accorgimenti opportuni, quali quello di contenere la dimensione delle aperture longitudinali entro $1/20$ della lunghezza d’onda del segnale di disturbo.

RIMEDI PER IL MIGLIORAMENTO DELLA EMC

L'interferenza EM può essere ridotta a livello di:

- 1) sorgente del disturbo,
- 2) recettore del disturbo,
- 3) meccanismo di accoppiamento.



agendo sulla disposizione circuitale (layout) e dotando i sistemi di filtri e di schermature.

Accoppiamento conduttivo: agire evitando connessioni fra sistemi indipendenti o, quando la connessione è necessaria, cercando di minimizzare l'impedenza in comune.

Accoppiamento capacitivo: il disturbo è tanto maggiore quanto più elevata è la differenza di tensione fra i due circuiti, quanto maggiore è la frequenza delle tensioni e quanto più vicini sono i circuiti.

Accorgimento: utilizzo di cavi schermati.

Accoppiamento induttivo: il disturbo è tanto maggiore quanto più elevate sono le correnti esterne al circuito e quanto maggiore è la loro frequenza, quanto più sbilanciate sono le correnti nei collegamenti di andata e di ritorno, quanto più vicini sono i circuiti e quanto maggiore è l'area che coprono.

Accorgimenti: mantenere l'area delle installazioni più piccola possibile, massimizzare la distanza da linee con elevate correnti, separare le reti di potenza dalle reti dati, evitare sistemi di distribuzione TN-C (funzioni di neutro e protezione combinate in un solo conduttore).

L'accoppiamento induttivo può tuttavia essere anche utile per controllare i disturbi. Se le canaline e i cavi coassiali sono installati in modo da avere connessioni corte con bassa impedenza anche alle alte frequenze, essi forniscono una schermatura dei cavi contro campi magnetici esterni, specialmente alle alte frequenze.

PRINCIPALI NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Esistono due categorie principali di norme: quelle che riguardano i livelli di emissioni tollerate e quelle che riguardano il livello di suscettibilità elettromagnetica ammessa per un'apparecchiatura.

Il principale obiettivo di queste norme è di delineare quanto più precisamente possibile l'ambiente di misura (spazio libero, camera anecoica), le condizioni di misura (lunghezza dei cavi, distanza delle antenne, altezza, angolo, ecc.), la calibrazione e sintonizzazione dei dispositivi di misura utilizzati, tutto con l'intento di poter condurre misure affidabili e facilmente riproducibili.

CEI EN 55011: Apparecchi industriali, scientifici e medicali (ISM) – Caratteristiche di radiodisturbo – Limiti e metodi di misura.

Specifica le procedure per la misura dei radiodisturbi e i limiti nella gamma di frequenze da 9kHz a 400GHz che si applicano agli apparecchi industriali, scientifici e medicali (ISM) che utilizzano la radiofrequenza per il loro funzionamento. Sono inclusi nel campo di applicazione della presente Norma anche gli apparecchi di illuminazione ISM e gli irradiator UV funzionanti a frequenze all'interno delle bande ISM definite dai Regolamenti Radio ITU, mentre apparecchiature trattate da altre norme CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques), che fa parte dell'IEC - International Electrotechnical Commission) sono escluse dallo scopo della presente Norma.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

CEI EN 55014: Compatibilità elettromagnetica - Prescrizioni per gli elettrodomestici, gli utensili elettrici e gli apparecchi simili.

Parte 1: Emissione. Si applica ai radiodisturbi condotti e irradiati provenienti dagli apparecchi le cui principali funzioni sono espletate da motori o da dispositivi di commutazione o di regolazione, a meno che l'energia a radiofrequenza non sia intenzionalmente generata o prevista per l'illuminazione. Gli apparecchi compresi nel campo di applicazione sono: gli elettrodomestici, gli utensili elettrici, i dispositivi di comando o di regolazione che utilizzano dispositivi a semiconduttore, gli apparecchi elettromedicali a motore, i giocattoli elettrici/elettronici, i distributori automatici, i proiettori cinematografici o per diapositive.

Parte 2: Immunità – Norma di famiglia di prodotti. Stabilisce requisiti uniformi per l'immunità ai disturbi elettromagnetici degli elettrodomestici e degli apparecchi simili, come pure dei giocattoli e degli utensili elettrici. Inoltre rientrano nell'ambito della presente Norma gli apparecchi destinati ai negozi, all'industria leggera ed alle fattorie, nonché le apparecchiature di cottura a microonde, a radiofrequenza e ad induzione e quelle a raggi ultravioletti ed infrarossi per la cura della persona.

CEI EN 55022: Apparecchi per la tecnologia dell'informazione - Caratteristiche di radiodisturbo - Limiti e metodi di misura.

Si applica alle apparecchiature per il trattamento dell'informazione (ITE) e detta le prescrizioni per le misure di emissione di radiodisturbi tra 9kHz e 400GHz per le apparecchiature di classe A e di classe B. La Norma fissa anche in modo univoco modalità di misura, di allestimento e di interpretazione dei risultati.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

CEI EN 55015: Limiti e metodi di misura delle caratteristiche di radiodisturbo degli apparecchi di illuminazione elettrici e degli apparecchi analoghi.

Si applica all'emissione (irradiata e condotta) dei radiodisturbi (frequenze: 9kHz- 400GHz) prodotti:

- da tutti gli apparecchi aventi come funzione prevalente quella di generare e distribuire luce a scopo di illuminazione, destinati ad essere collegati alla rete elettrica a bassa tensione o ad essere alimentati a batteria;
- dalla parte destinata all'illuminazione degli apparecchi a funzioni multiple;
- dagli apparecchi ausiliari destinati ad essere utilizzati esclusivamente con apparecchi di illuminazione;
- dagli apparecchi a raggi ultravioletti e infrarossi;
- dalle insegne pubblicitarie al neon;
- dagli apparecchi di illuminazione stradale e di aree pubbliche esterne;
- dagli apparecchi di illuminazione dei mezzi di trasporto (autobus e treni).

Sono esclusi:

- gli apparecchi di illuminazione funzionanti nelle bande di frequenze ISM;
- gli apparecchi di illuminazione per aerei e aeroporti;
- gli apparecchi per i quali le prescrizioni EMC nella gamma delle radiofrequenze sono formulate in altre norme IEC e CISPR.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

CEI EN 60555-1: Disturbi nelle reti di alimentazione prodotti da apparecchi elettrodomestici e da equipaggiamenti elettrici simili. Parte 1: Definizioni.

CEI EN 61000: Compatibilità elettromagnetica (EMC).

Parte 2: Ambiente.

Sezione 2: Livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza e la trasmissione dei segnali sulle reti pubbliche di alimentazione a bassa tensione.

Definisce i livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza e la trasmissione dei segnali sulle reti pubbliche di alimentazione a bassa tensione. La gamma di frequenze interessata è da 0Hz a 9kHz , con estensione a 148,5kHz per la trasmissione dei segnali sulla rete. I livelli di compatibilità si applicano, nel punto di connessione comune alla rete, ai sistemi di distribuzione pubblica a bassa tensione in c.a. con tensione nominale fino a 420V monofase o a 690V trifase, con frequenza nominale di 50Hz o di 60Hz.

Sezione 4: Livelli di compatibilità per disturbi condotti in bassa frequenza negli impianti industriali.

Fornisce i livelli di compatibilità per le reti industriali e non pubbliche a tensioni nominali fino a 35kV e alla frequenza nominale di 50 o 60Hz. Non fanno parte dello scopo della presente Norma i sistemi di alimentazione per navi, aeromobili, piattaforme "off-shore" e ferrovie. I livelli di compatibilità specificati si applicano al punto di accoppiamento d'impianto (IPC) all'interno degli impianti industriali o di altre reti non pubbliche e sono relativi ai disturbi condotti nella gamma di frequenza 0 - 9kHz. I principali tipi di disturbi considerati sono: le variazioni di ampiezza e di frequenza, le brevi interruzioni e i picchi di tensione, la presenza di armoniche, lo sbilanciamento di fase, le sovratensioni transitorie.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 9: Descrizione dell'ambiente HEMP - Disturbi irradiati.

Definisce l'ambiente HEMP (impulso elettromagnetico ad alta quota), conseguenza di un'esplosione nucleare ad alta quota. Gli impulsi elettromagnetici legati all'esplosione possono disturbare e anche danneggiare i sistemi elettronici e le reti elettriche. Scopo della presente sezione è stabilire un riferimento comune per l'ambiente HEMP, che permetta di stabilire delle sollecitazioni realistiche da applicare alle apparecchiature vittime per valutarne le prestazioni.

Sezione 10: Descrizione dell'ambiente HEMP - Disturbi condotti.

Definisce l'ambiente condotto HEMP, che è una delle conseguenze di un'esplosione nucleare ad alta quota, e stabilisce un riferimento comune per l'ambiente condotto HEMP, scegliendo delle sollecitazioni realistiche da applicare alle apparecchiature vittime, come sistemi di comunicazione, elettronici ed elettrici, per valutarne le prestazioni.

Sezione 12: Livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza e la trasmissione di segnali sulle reti pubbliche di alimentazione a media tensione.

Definisce i livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza e la trasmissione dei segnali sulle reti pubbliche di alimentazione in media tensione in c.a., con tensione nominale compresa tra 1kV e 35kV e con frequenza nominale di 50Hz o di 60Hz. La gamma di frequenze considerata per i disturbi è da 0Hz a 9kHz, con estensione a 148,5kHz per la trasmissione dei segnali sulla rete. I livelli di compatibilità si applicano: a) nel punto comune di connessione per le installazioni private nelle quali l'apparecchiatura è collegata direttamente o attraverso trasformatori; b) ai morsetti di media tensione per le sottostazioni che alimentano sistemi di distribuzione pubblici a bassa tensione.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Parte 3: Limiti.

Sezione 2: Limiti per le emissioni di corrente armonica (apparecchiature con corrente di ingresso $\leq 16 A$ per fase).

Definisce i limiti, in condizioni specifiche di prova, delle correnti armoniche immesse nella rete pubblica di distribuzione a bassa tensione dagli apparecchi elettrici ed elettronici, comprese le apparecchiature per saldatura ad arco non professionali, con corrente assorbita inferiore o uguale a 16A per fase. La Norma non è applicabile alle apparecchiature per saldatura ad arco professionali, che possono essere soggette a restrizioni di installazione, come indicato nella IEC 61000-3-4.

Sezione 3: Limitazione delle variazioni di tensioni, delle fluttuazioni di tensione e del flicker in sistemi di alimentazione in bassa tensione per apparecchiature con corrente nominale $\leq 16 A$ per fase e non soggette ad allacciamento su condizione.

Definisce i limiti di variazioni di tensione che possono essere prodotte da un'apparecchiatura provata in specifiche condizioni e fornisce la guida sui metodi di verifica. E' applicabile ad apparecchiature elettriche ed elettroniche che hanno una corrente in ingresso fino a ed inclusi 16A per fase e previste per essere liberamente collegate a sistemi di distribuzione pubblica di bassa tensione tra 220V e 250V a 50Hz tra fase e neutro. Le apparecchiature che, provate secondo quanto definito nell'Art. 6.4, non soddisfano i requisiti di questa Norma non possono essere dichiarate conformi e possono essere valutate o riprovate secondo i criteri della Norma EN/IEC 61000-3-11, che prescrive le modalità di valutazione di apparecchiature con corrente nominale inferiore o uguale a 75A per fase e soggette ad allacciamento sotto condizione.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 4: Livelli di compatibilità per disturbi condotti in bassa frequenza negli impianti industriali.

Fornisce i livelli di compatibilità per le reti industriali e non pubbliche a tensioni nominali fino a 35kV e alla frequenza nominale di 50 o 60Hz. Non fanno parte dello scopo della presente Norma i sistemi di alimentazione per navi, aeromobili, piattaforme "off-shore" e ferrovie. I livelli di compatibilità specificati si applicano al punto di accoppiamento d'impianto (IPC) all'interno degli impianti industriali o di altre reti non pubbliche e sono relativi ai disturbi condotti nella gamma di frequenza 0 - 9kHz. I principali tipi di disturbi considerati sono: le variazioni di ampiezza e di frequenza, le brevi interruzioni e i picchi di tensione, la presenza di armoniche, lo sbilanciamento di fase, le sovratensioni transitorie.

Sezione 11: Limitazione delle variazioni di tensione, delle fluttuazioni di tensione e del flicker in sistemi di alimentazione pubblici a bassa tensione - Apparecchiature con correnti nominali < 75 A e soggetti ad allacciamento su condizione.

Specifica limiti di emissione per le variazioni di tensione, le fluttuazioni di tensioni e il flicker per le apparecchiature collegate alle reti elettriche pubbliche a bassa tensione. Essa si applica principalmente alle apparecchiature elettriche ed elettroniche con correnti nominali di ingresso da 16A a 75A soggette ad allacciamento su condizione. Essa è però anche applicabile alle apparecchiature con correnti nominali ≤ 16 A , oggetto della CEI EN 61000-3-3, qualora esse non siano conformi ai limiti prescritti da tale norma: anche per queste apparecchiature è previsto però l'allacciamento su condizione.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 12: Limiti per le correnti armoniche prodotte da apparecchiature collegate alla rete pubblica a bassa tensione aventi correnti di ingresso $> 16 A$ e $\leq 75 A$ per fase.

Definisce i limiti per le correnti armoniche iniettate dalle apparecchiature con correnti nominali di ingresso superiori a 16A e inferiori o uguali a 75A per fase nelle reti di distribuzione pubblica a bassa tensione a 50 o 60Hz con tensione nominale sino a 240V, monofase, due o tre conduttori, oppure con tensione nominale sino a 690V, trifase, tre o quattro conduttori. Nel dettaglio, la norma stabilisce i requisiti e i limiti di emissione per le apparecchiature, nonché i metodi di prova e i metodi per effettuare le simulazioni, perché la conformità alla presente Norma può anche essere determinata da simulazioni opportunamente validate. La presente Norma non si applica ad apparecchiature connesse ad una rete privata che sia collegata a reti a media o alta tensione. I limiti di corrente armonica per apparecchiature con correnti nominali di ingresso inferiori o uguali a 16A per fase sono definiti dalla EN/IEC 61000-3-2, ma nel caso di apparecchiature professionali che non rispettino i limiti della EN/IEC 61000-3-2 è possibile applicare i limiti della presente Norma a determinate condizioni descritte nell'allegato C.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Parte 4: Tecniche di prova e di misura.

Sezione 1: Panorama della serie IEC 61000-4.

Fornisce un quadro completo delle norme di base della serie 61000-4, che sono soprattutto procedure per le prove di immunità ai vari tipi di disturbo. Fornisce inoltre indicazioni ai comitati di prodotto per la scelta delle prove che si applicano ai vari tipi di apparecchiature e sistemi.

Sezione 2: Prove di immunità a scariche di elettricità statica.

Riguarda le prescrizioni relative all'immunità e ai metodi di prova per apparecchiature elettriche ed elettroniche sottoposte a scariche di elettricità statica causate dagli operatori e dagli oggetti adiacenti, in modo diretto e in modo indiretto. Le apparecchiature, i sistemi, i sottosistemi e le periferiche possono essere interessati da scariche di elettricità statica a causa delle condizioni ambientali e di installazione, come bassa umidità relativa, uso di tappeti a bassa conduttività, indumenti in tessuto sintetico, ecc. La Norma definisce la gamma dei livelli di prova relativi a diverse condizioni ambientali e di installazione e stabilisce l'allestimento e la procedura di prova, oltre che specificare la forma d'onda tipica della corrente di scarica, la gamma dei livelli, l'apparecchiatura da usare e fornire infine le specifiche per le prove eseguite in "laboratorio" e per le prove "successive all'installazione" eseguite su apparecchiature nelle condizioni finali di installazione. Scopo della presente Norma è quindi quello di stabilire un riferimento comune e riproducibile per la valutazione delle prestazioni di immunità delle suddette apparecchiature quando sono sottoposte a scariche elettrostatiche, comprese quelle che possono avvenire da parte di operatori verso oggetti vicini alla apparecchiatura da salvaguardare.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 3: Prova di immunità ai campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati.

Definisce le caratteristiche richieste ai siti di prova e le procedure di prova per la verifica dell'immunità delle apparecchiature elettriche ed elettroniche ai campi elettromagnetici a radio-frequenza, prodotti da varie sorgenti, con particolare attenzione ai radio telefoni digitali. Si tratta di una norma di base, che costituisce, per il fenomeno elettromagnetico considerato, il riferimento per le prove di immunità da inserire nelle norme di prodotto e nelle norme generiche. Definisce inoltre una serie di livelli di prova preferenziali per le sorgenti di tipo generale nella gamma di frequenza 80MHz - 1000MHz e una serie per i radiotelefoni digitali operanti nelle bande 800MHz - 960MHz e 1,4GHz - 6GHz.

Sezione 4: Prova di immunità a transitori/raffiche di impulsi elettrici veloci.

È la Norma per l'immunità delle apparecchiature elettriche ed elettroniche a transitori veloci /raffiche di transitori originati da commutazioni, rimbalzi dei contatti dei relè, ecc., su porte di alimentazione, di terra, di segnale e di controllo. Essa definisce modalità riproducibili per prove, da eseguire in laboratorio o dopo l'installazione dell'apparecchiatura, per la valutazione dell'immunità delle apparecchiature sottoposte ai suddetti transitori; in particolare la Norma specifica la forma d'onda di tensione, la taratura e la regolazione delle apparecchiatura di prova, la configurazione di prova e definisce anche la gamma dei livelli di prova.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 5: Prova di immunità ad impulso.

Si riferisce ai requisiti di immunità, ai metodi di prova e alla gamma dei livelli di prova raccomandati per le apparecchiature nei riguardi di impulsi unidirezionali causati da sovratensioni derivanti da transitori di commutazioni oppure da fulmini. Vengono definiti differenti livelli di prova che si riferiscono a diverse condizioni ambientali e di installazione. Questi requisiti sono sviluppati per ed applicabili ad apparecchiature elettriche ed elettroniche. Obiettivo della presente Norma è stabilire un riferimento comune per la valutazione delle prestazioni delle apparecchiature sottoposte a disturbi impulsivi ad alta energia.

Sezione 6: Immunità ai disturbi condotti, indotti da campi a radiofrequenza.

Detta le modalità di esecuzione della prova di immunità di apparecchiature elettriche ed elettroniche ai disturbi elettromagnetici indotti sui cavi da trasmettitori intenzionali di radiofrequenza nell'intervallo di frequenza da 9kHz a 80MHz. Le apparecchiature non aventi almeno un cavo di collegamento che possa accoppiare gli apparecchi ai campi a radiofrequenza disturbanti non sono soggette a questa prova. Obiettivo principale di questa Norma è di dare un riferimento di base oggettivo e coerente per la valutazione dell'immunità funzionale delle apparecchiature elettriche ed elettroniche sottoposte a disturbi indotti sui cavi da campi a radiofrequenza.

Sezione 7: Guida generale per le misure di armoniche e interarmoniche e relativa strumentazione, applicabile alle reti di alimentazione ed agli apparecchi ad esse connessi.

Definisce la strumentazione e i metodi necessari per misurare, per frequenze fino a 9kHz, le componenti armoniche ed interarmoniche prodotte dagli apparati connessi alle reti di distribuzione dell'energia elettrica a 50 e 60Hz.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 8: Prova di immunità a campi magnetici a frequenza di rete.

Tratta delle prescrizioni di immunità ai disturbi continui e di breve durata generati da campo magnetico alla frequenza di rete di 50 o di 60Hz e relativi ad ambienti residenziali e commerciali leggeri, ambienti industriali, stazioni di generazione di energia e sottostazioni a media e ad alta tensione. La Norma non considera i disturbi dovuti ad accoppiamenti induttivi o capacitivi nei cablaggi o in altre parti delle installazioni. Come in tutte le Norme di base, si indicano i livelli di prova raccomandati, si definiscono le caratteristiche delle apparecchiature di prova, si stabilisce l'allestimento di prova e si fissano le modalità di esecuzione della stessa.

Sezione 9: Prova di immunità a campo magnetico impulsivo.

Riporta i requisiti di immunità di apparecchiature, soltanto durante le condizioni di funzionamento, a disturbi magnetici impulsivi relativi principalmente a: a) impianti elettrici ed installazioni industriali; b) sottostazioni di media ed alta tensione. Scopo di questa Norma è quello di stabilire una base comune e riproducibile per la valutazione delle prestazioni delle apparecchiature elettriche ed elettroniche per applicazioni domestiche, commerciali ed industriali quando sono sottoposte a campi magnetici impulsivi. Definisce: i livelli di prova raccomandati, l'apparecchiatura di prova, l'allestimento della prova, la procedura di prova. Essa non considera invece disturbi dovuti ad accoppiamento capacitivo o induttivo in cavi o altri elementi dell'installazione in campo.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 10: Prova di immunità a campo magnetico oscillatorio smorzato.

È relativa ai requisiti di immunità di apparecchiature, soltanto in condizioni di funzionamento, a disturbi magnetici oscillatori smorzati relativi a sottostazioni di media ed alta tensione. Lo Scopo della Norma è quello di stabilire una base comune e riproducibile per la valutazione delle prestazioni delle apparecchiature elettriche ed elettroniche per sottostazioni di media tensione e di alta tensione sottoposte a campi magnetici oscillatori smorzati. Definisce i livelli di prova raccomandati, l'apparecchiatura di prova, l'allestimento della prova, la procedura di prova. Essa non considera disturbi dovuti ad accoppiamento capacitivo o induttivo con cavi o altri elementi dell'installazione in campo.

Sezione 11: Prove di immunità a buchi di tensione, brevi interruzioni e variazioni di tensione.

Definisce i metodi di prova di immunità ed il campo dei livelli di prova preferiti per apparecchiature elettriche ed elettroniche collegate a reti di alimentazione in bassa tensione per buchi di tensione, brevi interruzioni e variazioni di tensione. Si applica ad apparecchiature elettriche ed elettroniche che hanno un valore di corrente in ingresso che non supera i 16A per fase, per connessione a reti c.a. a 50Hz e 60Hz. Non si applica ad apparecchiature elettriche ed elettroniche collegate a reti in c.a. a 400Hz.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 12: Prova di immunità a onde oscillatorie.

Definisce i requisiti di immunità ed i metodi di prova per apparecchiature elettriche ed elettroniche, in condizioni di esercizio normali, ad onde oscillatorie smorzate non ripetitive (ring wave) che si verificano in linee di alimentazione in bassa tensione, di controllo e di segnale alimentate da reti pubbliche e non pubbliche. Lo scopo è stabilire i requisiti di immunità e un riferimento comune per la valutazione in laboratorio delle prestazioni delle suddette apparecchiature destinate ad applicazioni domestiche, commerciali e industriali, come pure, quando applicabile, alle apparecchiature per centrali e sottostazioni elettriche.

Sezione 13: Prove di immunità a bassa frequenza alle armoniche e alle interarmoniche, inclusi i segnali trasmessi sulle reti, sulle porte di alimentazione a corrente alternata.

Definisce i metodi di prova di immunità di apparecchiature elettriche ed elettroniche a bassa tensione con correnti nominali fino a 16A alle armoniche e interarmoniche, compresi i segnali sulle reti. Per le reti a 50Hz la Norma è applicabile fino a frequenze di 2kHz e fino a frequenze di 2,4kHz per le reti a 60Hz.

Sezione 14: Prova di immunità a fluttuazioni di tensione.

Considera le prove di immunità per le apparecchiature elettriche e/o elettroniche nel loro ambiente elettromagnetico. Sono considerati solo i fenomeni condotti, incluse le prove di immunità per le apparecchiature, collegate a reti di alimentazione pubbliche e industriali, aventi un valore di corrente in ingresso fino a 16A per fase. Sono escluse le apparecchiature collegate a reti di distribuzione in c.c. o in c.a. a 400Hz. La presente Norma vuole stabilire un riferimento per valutare l'immunità delle apparecchiature quando sono sottoposte a fluttuazioni di tensione positive e negative di ampiezza ridotta, escluso il flicker.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 15: Tecniche di prova e di misura - Flickermetro - Specifiche funzionali e di progetto.

Fornisce informazioni base per la progettazione e sul funzionamento di un apparecchio analogico o digitale di misura del flicker. Essa non riporta valori limite di tolleranze della severità del flicker; mentre è invece indicato un metodo per la valutazione della severità del flicker per tutte le fluttuazioni di tensione caratterizzate da forme d'onda di interesse pratico. Le specifiche qui prescritte si riferiscono solo a misure su reti a 120V e 230V, 50 e 60Hz, mentre per altre tensioni, per le quali specifiche dettagliate non sono disponibili, si danno le condizioni per le quali si possono eventualmente applicare opportuni fattori di correzione.

Sezione 16: Prova di immunità ai disturbi condotti di modo comune nella gamma di frequenze da 0 a 150 kHz.

Si riferisce alle prescrizioni di immunità e ai metodi di prova delle apparecchiature elettriche ed elettroniche relativi ai disturbi condotti di modo comune nel campo di frequenza dalla c.c. a 150kHz. Scopo della presente Norma è stabilire una base comune e riproducibile per provare le apparecchiature elettriche ed elettroniche con l'applicazione di disturbi di modo comune alle porte di alimentazione, di comando, di segnale e di comunicazione.

Sezione 17: Prova di immunità all'ondulazione residua sulla porta di alimentazione in c.c..

Definisce i metodi di prova per l'immunità all'ondulazione residua sulla porta di alimentazione in c.c. delle apparecchiature elettriche ed elettroniche alimentate da sistemi raddrizzatori esterni o da batterie sotto carica. Lo scopo è stabilire una base comune e riproducibile per provare in laboratorio le apparecchiature elettriche ed elettroniche quando sono sottoposte a tensioni ondulate residue.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 18: Prova di immunità alle onde oscillatorie smorzate.

Definisce i requisiti di immunità ed i metodi di prova per apparecchiature elettriche ed elettroniche, in condizioni di esercizio normali, ad onde oscillatorie smorzate ripetitive che si verificano: a) nei cavi di potenza, di controllo e di segnale installati nelle sottostazioni AT e MT; b) nei cavi di potenza, di controllo e di segnale installati nelle sottostazioni blindate in gas compresso (GIS) e in qualche caso anche nelle sottostazioni in aria (AIS) e in altre installazioni a causa di fenomeni HEMP. Scopo della Norma è stabilire i requisiti di immunità e un riferimento comune per la valutazione in laboratorio delle prestazioni delle suddette apparecchiature destinate ad applicazioni domestiche, commerciali e industriali, come pure, quando applicabile, alle apparecchiature per centrali e sottostazioni elettriche.

Sezione 20: Prove di emissione e di immunità in guide d'onda.

Definisce i metodi per le prove di emissione e immunità sulle apparecchiature elettriche ed elettroniche da eseguire in diversi tipi di guide d'onda elettromagnetica trasversa (TEM). La gamma di frequenza di utilizzo dipende dai requisiti di prova e dalla specifica tipologia di dispositivo TEM utilizzato. Lo scopo di questa norma è di descrivere: a) caratteristiche dei dispositivi TEM, inclusa la frequenza tipica di funzionamento e i limiti sulle dimensioni dell'oggetto in prova; b) metodi di validazione delle guide d'onda TEM per le prove EMC; c) definizione dell'oggetto in prova (cablaggi e involucro); d) allestimento di prova, procedure e requisiti per prove di emissione radiata in dispositivi TEM, e) allestimento di prova, procedure e requisiti per prove di immunità radiata in dispositivi TEM.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 21: Metodi di prova in camera riverberante.

Specifica le caratteristiche delle camere riverberanti e le relative procedure di prova che permettono di verificare i livelli di emissione e di immunità a campi elettromagnetici irradiati di apparecchi elettrici ed elettronici, nonché l'efficienza di sistemi schermanti. Tale sito di prova, con le relative modalità di validazione e di utilizzo, è proposto ai Comitati di prodotto come alternativa ad altri siti di prova nello svolgimento di prove con campi irradiati ad alta frequenza, in relazione al tipo di apparecchio o sistema da verificare. In questa Norma - il cui obiettivo è quello di fissare dei riferimenti condivisi per l'utilizzo delle camere riverberanti nella valutazione delle prestazioni di apparecchiature elettriche ed elettroniche sottoposte a campi elettromagnetici e per determinare i livelli di radiofrequenza emessi da dette apparecchiature - si considerano solo fenomeni irradiati.

Sezione 22: Misure di emissione e immunità irradiata in camere completamente anecoiche (FAR).

Tratta prove di emissione e immunità per apparecchiature elettriche e elettroniche; si considerano solamente fenomeni di natura radiata. La norma definisce le procedure di prova per l'utilizzo delle camere completamente anecoiche, stabilendo anche una procedura di validazione comune e prescrizioni per l'allestimento dell'EUT. Essendo una norma di base, non specifica limiti di emissione o immunità da applicarsi ad una specifica apparecchiatura. I metodi di prova descritti sono applicabili a misure radiate nella gamma di frequenza da 30MHz a 18GHz.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 23: Metodi di prova dei dispositivi di protezione per l'HEMP e altri disturbi irradiati.

Presenta le procedure per provare gli elementi schermanti nei riguardi degli impulsi ripidi ad alto contenuto energetico (impulsi HEMP e altri disturbi irradiati di caratteristiche simili). Vengono date indicazioni sui criteri generali di definizione delle prove, sulle configurazioni di prova, sulle apparecchiature necessarie per la loro esecuzione, sui metodi di prova, sui criteri di elaborazione dei risultati.

Sezione 24: Metodi per la prova dei dispositivi di protezione sollecitati da disturbi condotti di tipo HEMP.

La presente Sezione fa parte della serie di Pubblicazioni che copre la categoria dell'immunità agli impulsi elettromagnetici nucleari ad alta quota (HEMP). Si occupa dei metodi per la prova dei dispositivi di protezione sollecitati da disturbi condotti di tipo HEMP. Essa si occupa principalmente della prova delle caratteristiche di tenuta della tensione di scarica e di limitazione della tensione, ma anche di metodi di misura della tensione residua in presenza di HEMP, quando si verificano variazioni rapidissime nel tempo di tensione e di corrente.

Sezione 25: Metodi di prova di immunità ai disturbi HEMP per apparecchiature e sistemi.

Descrive i livelli di prova di immunità e i relativi metodi di prova per le apparecchiature e i sistemi elettrici ed elettronici con riferimento ai disturbi elettromagnetici, condotti e irradiati, provocati dall'impulso HEMP. In particolare, per quanto riguarda le prove di immunità irradiata vengono date prescrizioni sia per i piccoli laboratori di prova, sia per i simulatori HEMP di grandi dimensioni. La Norma contiene anche utili informazioni sulle problematiche particolari relative all'accoppiamento di questi particolari disturbi transitori con gli apparati e i sistemi, sulla loro propagazione, sulle specificità della schermatura, ecc..

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 27: Prove di immunità agli squilibri di tensioni per apparecchiature con una corrente di ingresso non superiore a 16 A per fase.

Definisce le modalità per le prove di immunità allo sbilanciamento delle tensioni di alimentazione delle apparecchiature elettriche ed elettroniche trifase a 50/60 Hz, con correnti nominali fino a 16A, collegate alle reti pubbliche e industriali. Si tratta di una norma di base da essere presa come riferimento nelle norme di prodotto o nelle norme generiche qualora sia previsto che le apparecchiature oggetto di tali norme possano essere alimentate da tensioni trifase squilibrate e siano sensibili a tale tipo di disturbo.

Sezione 28: Prova di immunità alle variazioni della frequenza di alimentazione.

Definisce le metodologie per le prove di immunità alle variazioni della frequenza della tensione di alimentazione, da effettuarsi sulle apparecchiature elettriche ed elettroniche allacciate a reti di distribuzione dell'energia elettrica pubbliche e industriali. Considerato il tipo di perturbazione elettromagnetica, sono previste solo prove di immunità di tipo condotto.

Sezione 29: Prove di immunità ai buchi di tensione, alle brevi interruzioni e alle variazioni di tensione sulle porte di alimentazione a tensione continua.

Definisce le modalità per le prove di immunità ai buchi di tensione, alle brevi interruzioni e alle variazioni di tensione sulle porte di alimentazione a tensione continua delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, alimentate da reti esterne a tensione continua. Si tratta di una norma di base da essere presa come riferimento nelle norme di prodotto o nelle norme generiche qualora sia previsto che le apparecchiature oggetto di tali norme possano essere alimentate da tensioni continue e siano sensibili ai suddetti tipi di disturbo.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 30: Metodi di misura della qualità dell'alimentazione elettrica.

Definisce i metodi di misura in situ dei vari parametri che definiscono la qualità della potenza elettrica fornita o scambiata in un determinato punto della rete di trasmissione e distribuzione in sistemi a 50/60Hz. I parametri considerati sono quei fenomeni condotti che si possono riscontrare e misurare in un sistema di potenza tradizionale, come ampiezza della tensione, flicker, buchi e variazioni di tensione, interruzioni e transienti, armoniche ed interarmoniche, variazioni rapide di tensione, segnalamento su linee di potenza, ecc. Vengono definite due classi di prestazione e, per ciascuna di queste classi, vengono specificati, per i diversi parametri di qualità della potenza, metodi di misura, precisione, criteri di elaborazione e di valutazione dei risultati.

Sezione 34: Prove di immunità ai buchi di tensione e alle variazioni di tensione per le apparecchiature con corrente di ingresso superiore a 16 A per fase.

Definisce, con riferimento ai buchi di tensione, alle brevi interruzioni e alle variazioni di tensione, i metodi di prova di immunità e la gamma di livelli di prova preferenziali per gli apparecchi elettrici ed elettronici con correnti nominali di ingresso superiori a 16A per fase, collegati alle reti di distribuzione a bassa tensione. La Norma copre gli apparecchi installati in aree residenziali come pure il macchinario industriale, connessi a reti a 50Hz e a 60Hz, monofasi e trifasi.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Parte 5: Guida di installazione e di mitigazione.

Sezione 5: Specifica per dispositivi di protezione per i disturbi condotti.

Fa parte di una serie completa di pubblicazioni che copre l'intera categoria dell'immunità agli impulsi elettromagnetici nucleari ad alta quota (HEMP), i cui effetti possono disturbare i sistemi di comunicazione, di generazione di energia elettrica, della tecnologia dell'informazione, ecc.. La presente sezione definisce come devono essere specificati i dispositivi di protezione, per i disturbi condotti, proposti per la protezione dagli effetti delle esplosioni nucleari ad alta quota. Essa deve essere utilizzata per l'armonizzazione di specifiche esistenti o future emesse dai costruttori di dispositivi di protezione, dai costruttori di apparecchiature elettroniche, dalle amministrazioni e dagli utilizzatori finali. La presente sezione tratta delle protezioni utilizzate correntemente per la protezione dai transitori HEMP indotti sul segnale e su linee di segnale o di energia a bassa tensione (tensione nominale fino a 1kV c.a.). Le informazioni generali possono inoltre essere applicate alle linee ad alta tensione.

Sezione 7: Grado di protezione prodotto dagli involucri nei riguardi dei disturbi elettromagnetici (Codice EM).

Fornisce i codici di marcatura relativi alla schermatura elettromagnetica offerta dagli involucri vuoti che vengono poi impiegati per ricoprire le apparecchiature elettriche ed elettroniche. Vengono inoltre date alcune prescrizioni per valutare, mediante opportune misure sperimentali di efficienza di schermatura, il grado di protezione degli involucri riguardo ai disturbi elettromagnetici nelle gamma di frequenze comprese tra 10kHz e 40GHz.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Parte 6: Norme generiche.

Sezione 1: Immunità per gli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera.

La presente Norma, relativa alle prescrizioni sull'immunità ai disturbi elettromagnetici compresi nella gamma di frequenze da 0Hz a 400GHz, si applica alle apparecchiature elettriche ed elettroniche previste per essere usate in ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera, per le quali non esistono Norme di immunità di prodotto o di famiglie di prodotti. La presente Norma si applica alle apparecchiature previste per essere collegate direttamente alla rete pubblica di alimentazione a bassa tensione o a una particolare sorgente in c.c. che funga da interfaccia tra l'apparecchiatura e la rete pubblica di alimentazione a bassa tensione. Essa si applica anche alle apparecchiature funzionanti a batteria o alimentate da un sistema di distribuzione dell'energia a bassa tensione non pubblico, ma non industriale, se tali apparecchiature sono previste per gli ambienti citati sopra.

Sezione 2: Immunità per gli ambienti industriali.

Si applica alle apparecchiature elettriche ed elettroniche da utilizzare negli ambienti industriali, per i quali non esistono Norme sull'immunità riferite al prodotto o a famiglie di prodotti. Riguarda le prescrizioni di immunità comprese nella banda di frequenze da 0Hz a 400GHz. Gli ambienti considerati sono quelli industriali, sia interni che esterni. Le apparecchiature considerate sono previste per essere connesse ad una rete di potenza, derivata da un trasformatore di media o alta tensione dedicato, che alimenta una installazione per la distribuzione ad impianti manifatturieri o simili e il cui funzionamento è previsto in ambienti industriali o in prossimità di essi.

NORME SULLA EMC IN ELETTRONICA DI POTENZA

Sezione 3: Emissione per gli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera.

La presente Norma, relativa alle prescrizioni sull'emissione di disturbi elettromagnetici compresi nella gamma di frequenze da 0Hz a 400GHz, si applica alle apparecchiature elettriche ed elettroniche previste per essere usate in ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera, per le quali non esistono Norme di emissione di prodotto o di famiglie di prodotti. La presente Norma si applica alle apparecchiature previste per essere collegate direttamente alla rete pubblica di alimentazione a bassa tensione o a una particolare sorgente in c.c. che funga da interfaccia tra l'apparecchiatura e la rete pubblica di alimentazione a bassa tensione. La Norma si applica anche alle apparecchiature alimentate a batteria o da un sistema di alimentazione non pubblico, purché non industriale, se esse sono destinate ad essere usate negli ambienti sopra descritti.

Sezione 4: Emissione per gli ambienti industriali.

Ha lo scopo di definire i limiti e i metodi di prova per le apparecchiature elettriche ed elettroniche da utilizzare negli ambienti industriali, in relazione alle emissioni elettromagnetiche, che possono causare interferenze ad altre apparecchiature, nella gamma di frequenze da 0 a 400GHz e per le quali non esistono norme sull'emissione riferite al prodotto o a famiglie di prodotti. Gli ambienti considerati sono quelli industriali, sia interni che esterni. Le apparecchiature considerate sono previste per essere connesse ad una rete di potenza, derivata da un trasformatore di media o alta tensione dedicato, che alimenta una installazione per la distribuzione ad impianti manifatturieri o simili e il cui funzionamento è previsto in ambienti industriali o in prossimità di essi. La Norma si applica anche alle apparecchiature alimentate a batteria destinate ad essere usate in ambiente industriale.

NORMA CEI EN 61000-3-2

Limiti per le emissioni di corrente armonica (apparecchiature con corrente di ingresso $\leq 16 A$ per fase).

Classificazione delle apparecchiature:

- classe A: apparecchiature trifase bilanciate e tutte le altre apparecchiature non specificate nelle successive tre classi;
- classe B: utensili portatili e apparecchiature per saldature ad arco non professionali;
- classe C: apparecchiature per l'illuminazione;
- classe D: apparecchiature con una potenza specificata inferiore o uguale a 600W, dei tipi seguenti: a) personal computer e monitor dei personal computer, b) ricevitori televisivi.

Tabella 1 – Limiti per le apparecchiature di Classe A

Ordine armonico n	Corrente armonica massima ammessa A
Armoniche dispari	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Armoniche pari	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

1) Limiti per le apparecchiature di classe A.

Per le apparecchiature di classe A, le armoniche della corrente di ingresso non devono superare i valori indicati in Tabella 1.

2) Limiti per le apparecchiature di classe B.

Per le apparecchiature di classe B, le armoniche della corrente di ingresso non devono superare i valori indicati in Tabella 1 moltiplicati per un fattore di 1,5.

NORMA CEI EN 61000-3-2

Tabella 2 – Limiti per le apparecchiature di Classe C

Ordine armonico n	Corrente armonica massima ammessa in percento della corrente di ingresso alla frequenza fondamentale %
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (solo armoniche dispari)	3

* λ è il fattore di potenza del circuito

1) *Limiti per le apparecchiature di classe C.*

- a) Potenza attiva di ingresso $> 25W$: le correnti armoniche non devono superare i limiti relativi riportati in Tabella 2.
- b) Potenza attiva di ingresso $\leq 25W$: le correnti armoniche non devono superare i limiti relativi alla potenza riportati nella colonna 2 di Tabella 3.

Tabella 3 – Limiti per le apparecchiature di Classe D

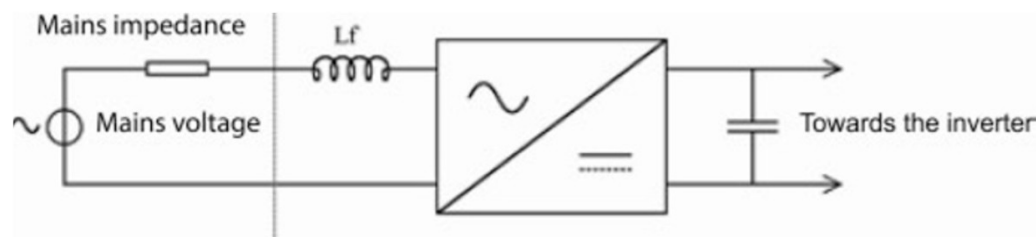
Ordine armonico n	Corrente armonica massima ammessa per watt mA/W	Corrente armonica massima ammessa A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (solo armoniche dispari)	$\frac{3,85}{n}$	Vedere Tabella 1

2) *Limiti per le apparecchiature di classe D.*

Per le apparecchiature di classe D, le correnti di ingresso alla frequenze armoniche non devono superare i valori che si possono derivare dalla Tabella 3.

DISTURBI CONDOTTI E POWER QUALITY: RIDUZIONE DELLA DISTORSIONE DI CORRENTE

La soluzione più semplice per ridurre la distorsione della corrente assorbita dai raddrizzatori a diodi è quella di inserire un'induttanza in serie.



Questa soluzione però determina una diminuzione del $\cos\phi$ e soprattutto causa una caduta di tensione che comporta la riduzione della tensione del dc-link, quindi il suo valore deve essere contenuto entro certi limiti.

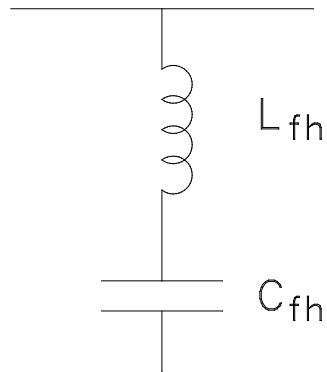
Il calcolo analitico di questa induttanza è parecchio complesso e quindi è preferibile ricorrere a simulazioni al calcolatore.

Una soluzione più avanzata per ridurre l'impatto sulla rete dei carichi distorcenti monofase è rappresentata dall'impiego di un correttore del fattore di potenza (PFC), volto ad assorbire una corrente proporzionale alla tensione di alimentazione in modo da costituire un carico equivalente puramente resistivo e quindi lavorare a fattore di potenza unitario.

Uno dei PFC più diffusi utilizza il convertitore boost, in quanto quest'ultimo è adatto all'impiego come PFC perché consente di mantenere costante la tensione di uscita anche per ampie variazioni della tensione di ingresso.

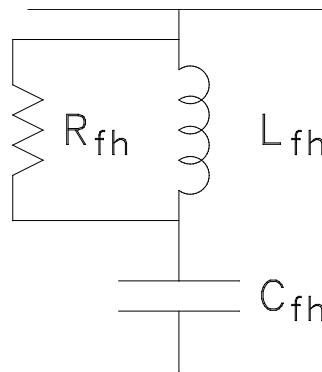
RIDUZIONE DELLA DISTORSIONE DI CORRENTE

Per potenze superiori, un'altra soluzione caratterizzata da costi limitati, affidabilità e semplicità realizzativa è costituita dai filtri passivi.



Filtro selettivo

$$\dot{Z} = j \left(\omega L_{fh} - \frac{1}{\omega C_{fh}} \right)$$



Filtro passaalto

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L_{fh} R_{fh}}{R_{fh} + j\omega L_{fh}} - j \frac{1}{\omega C_{fh}}$$

\swarrow ω bassa \searrow ω elevata

$$\dot{Z} \cong -j \frac{1}{\omega C_{fh}} \qquad \dot{Z} \cong R_{fh}$$

Limiti di questa soluzione sono:

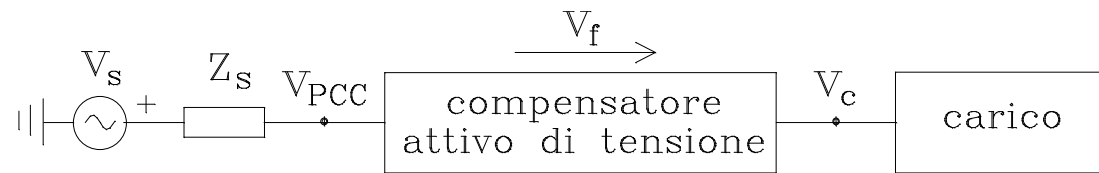
- la deriva con il tempo e la temperatura dei componenti,
- l'interazione con la rete che può dar luogo a fenomeni sia di risonanza parallelo che di sovraccarico,
- la lentezza dei transistori di assestamento.

Una soluzione più avanzata per ridurre l'impatto sulla rete dei carichi distorcenti trifase è rappresentata dall'impiego di un raddrizzatore a commutazione forzata, volto ad assorbire una corrente sinusoidale in fase con la tensione di alimentazione.

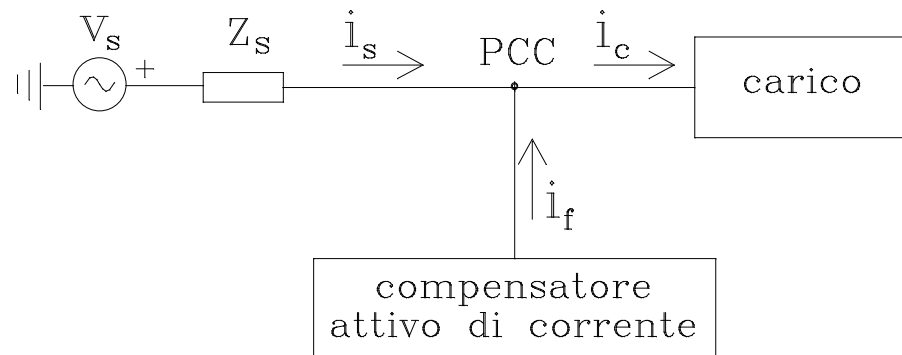
Un'ulteriore soluzione avanzata è rappresentata dai convertitori a matrice.

SISTEMI ATTIVI DI COMPENSAZIONE

Sono costituiti da convertitori statici cc/ca di tensione (compensatori attivi di tensione) oppure dai più diffusi convertitori statici cc/ca di tensione controllati in corrente (compensatori attivi di corrente). La tensione nel lato in alternata è controllata con tecniche di modulazione che consentono di variarne l'ampiezza in modo pressoché istantaneo.

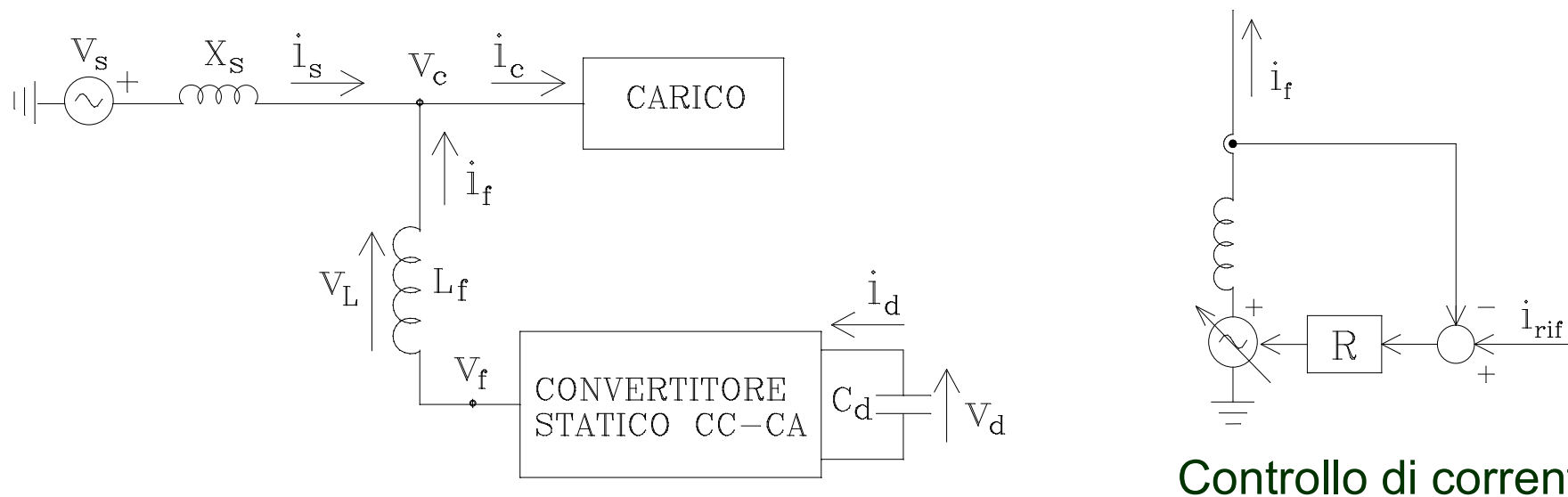


$$V_{PCC} = V_c - V_f$$



$$i_s = i_c - i_f$$

COMPENSATORI ATTIVI DI CORRENTE



Il riferimento di corrente è calcolato in base all'azione richiesta dal carico inquinante; ad esempio:

- carico distorto, filtraggio delle armoniche di corrente (filtro attivo);
- carico fortemente induttivo, compensazione della potenza reattiva (rifasatore attivo).

La compensazione della potenza reattiva di fatto viene raramente eseguita con i compensatori attivi perché risulterebbe troppo costosa. La compensazione della potenza reattiva può essere affiancata ad un'altra azione di compensazione oppure per essa si può sfruttare un convertitore che debba essere connesso alla rete per svolgere un'altra funzione principale (ad esempio interfacciare un sistema fotovoltaico). In alcuni casi la compensazione della potenza reattiva può essere svolta da un banco di condensatori affiancato al compensatore attivo.

DISTURBI ELETTROMAGNETICI LEGATI AD ACCOPPIAMENTO PER MEZZO DI CAMPI A BREVE DISTANZA

I convertitori più diffusi fonte di disturbi elettromagnetici che si propagano per mezzo di induttanze e capacità parassite sono soprattutto due tipologie di convertitori a commutazione forzata (la commutazione deve essere indotta dall'esterno sia in accensione che in spegnimento):

Invertitori, sono convertitori cc/ca. Ne esistono due tipologie: invertitori di tensione, o a tensione impressa, e invertitori di corrente, o a corrente impressa, in relazione al tipo di sorgente (rispettivamente di tensione e di corrente). I primi sono di gran lunga i più diffusi.

Alimentatori switching, sono convertitori cc/cc. Sono utilizzati per l'alimentazione della maggior parte dei sistemi elettronici. Essi hanno lo scopo di conseguire uno o più dei seguenti requisiti: a) stabilizzazione dell'uscita, b) isolamento, c) uscite multiple isolate fra loro e con tensioni e correnti diverse.

In questi convertitori la fonte del disturbo è rappresentata dalla commutazione forzata (hard switching) in alta frequenza degli interruttori. Durante le fasi di commutazione sia tensione che corrente sono diverse da zero e caratterizzate da derivate molto elevate.

Le norme tecniche impongono limiti molto stringenti su questo tipo di disturbi. Ad esempio la CEI-EN 61800-3 sugli azionamenti elettrici pone dei limiti dell'ordine dei mV (56-79 dB μ V) per le tensioni di disturbo nell'intervallo di frequenza 150 kHz – 30 MHz.

LISN E dB μ V

Gli scopi della “Line Impedance Stabilization Network” (LISN) sono:

- 1) presentare un’impedenza Z_{LISN} dell’alimentazione vista dal prodotto da testare costante su tutto l’intervallo di frequenza delle emissioni condotte;
- 2) bloccare le emissioni condotte non dovute al prodotto da testare, cosicché siano misurate solo quelle dovute al prodotto.

La Z_{LISN} ideale è pari ad una pura resistenza R_{LISN} di 50 Ω .

Il disaccoppiamento della LISN dalla linea di alimentazione viene però ottenuto mediante filtri, il cui effetto su Z_{LISN} non è trascurabile. Per conoscere Z_{LISN} con buona approssimazione al variare della frequenza è necessario tenere conto almeno dell’induttanza L_{LISN} di 50 μ H inserita in serie alla linea, che, vista dai morsetti del prodotto da testare, per effetto dei condensatori risulta in parallelo a R_{LISN} .

Unità di misura dB μ V: Di per sé i decibel corrispondono al rapporto fra due quantità e quindi sono adimensionali. Valori assoluti di potenza, tensione o corrente sono espressi in dB riferendo il loro valore ad una quantità base.

Nel caso specifico, ai fini della misura dei livelli di disturbo, le tensioni sono espresse con riferimento ad 1 μ V in dB μ V: $dB\mu V = 20\log_{10}(tensione [\mu V]/1\mu V)$

Esempi:

V	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³
dB μ V	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180

CONTENIMENTO DELLE EMISSIONI CONDOTTE

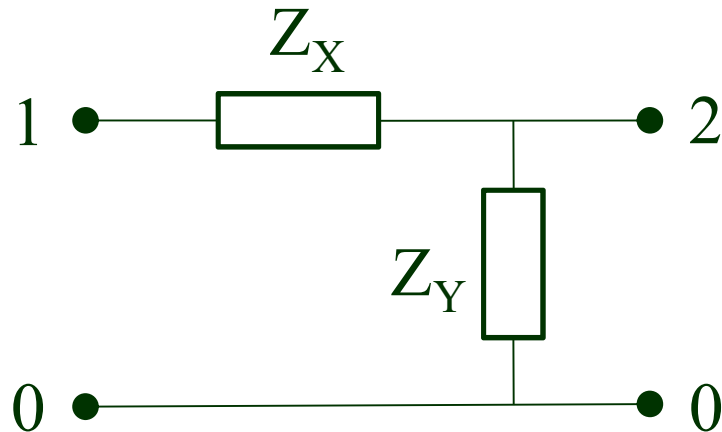
I disturbi legati ad accoppiamento per mezzo di campi a breve distanza di interesse sono quelli che stanno nell'intervallo di frequenze 150 kHz – 30 MHz, in quanto soggetti a precisi limiti indicati dalle norme tecniche. Questi disturbi sono annoverati fra le emissioni condotte perché il meccanismo di propagazione è di tipo conduttivo in quanto si trasmettono attraverso le impedenze parassite (capacità parassite e mutue induttanze parassite).

Al fine di ridurre le emissioni condotte si possono mettere in atto diverse misure:

- riduzione della frequenza di commutazione;
- scelta di componenti che consentano la minimizzazione degli elementi parassiti;
- riduzione delle derivate di tensione e corrente mediante il rallentamento del processo di commutazione (questo però comporta l'aumento delle perdite di commutazione);
- riduzione degli accoppiamenti capacitivi, che costituiscono una via di propagazione dei disturbi di modo comune (si possono utilizzare schermi elettrostatici e cavi schermati);
- riduzione dell'area di percorsi circolari dei conduttori nei quali si hanno forti variazioni delle correnti, che costituiscono mutue induttanze che portano alla propagazione di disturbi di modo differenziale;
- riduzione delle auto induttanze insite nei collegamenti elettrici;
- riduzione dell'impedenza della messa a terra e dell'area del percorso di andata e ritorno delle correnti;
- utilizzo di filtri di modo comune.

FILTRI DI MODO COMUNE

Struttura di filtro MC elementare



Problema EMC:

- presenza di una sorgente di correnti di disturbo in alta frequenza al morsetto 2,
- necessità di ridurre il livello di disturbo al morsetto 1.

Si deve limitare la propagazione delle correnti introducendo fra i morsetti 2 e 0 una via di ritorno Z_Y a bassa impedenza per le alte frequenze. Il componente che assicura questa funzione è un condensatore.

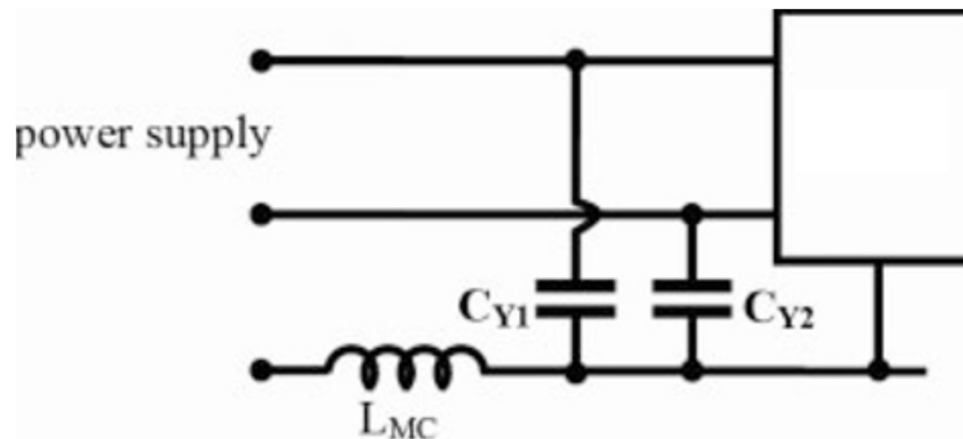
Per permettere che l'impedenza di Z_Y sia di gran lunga inferiore a quella di linea è probabile che sia richiesta una capacità molto elevata. Per evitare questo, è necessario aggiungere in serie alla linea l'elemento Z_X con un' impedenza elevata su un ampio intervallo di frequenze. Questo elemento è quindi induttivo.

FILTRI DI MODO COMUNE

Per capire la struttura di un filtro di modo comune è preferibile ragionare su un sistema monofase.

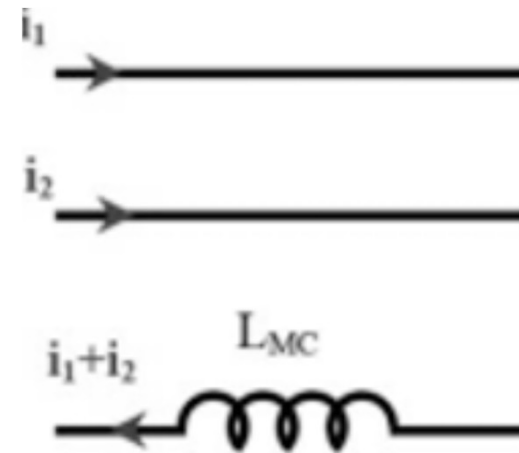
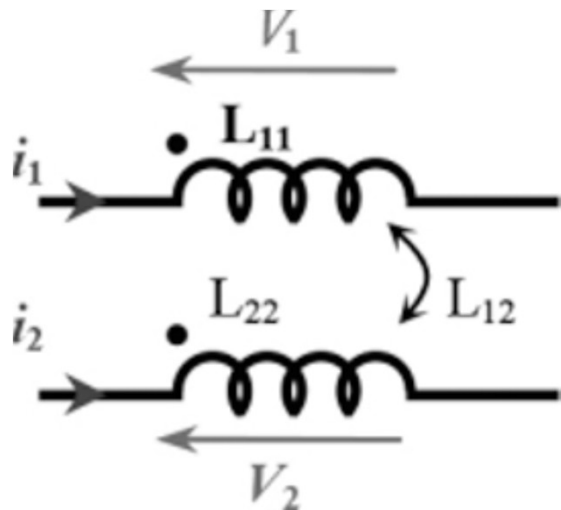
Prima idea per realizzare il filtro della slide precedente: un condensatore tra fase e terra (C_{Y1}) e uno tra neutro e terra (C_{Y2}) e un induttore sul conduttore di terra (L_{MC}). Tuttavia quest'ultimo elemento non è compatibile con la sicurezza delle persone e delle apparecchiature (tutte le parti metalliche devono essere connesse a terra senza alcun elemento interposto).

In alternativa si possono connettere un induttore in serie alla fase e uno in serie al neutro; tuttavia questi causerebbero delle cadute indesiderate a causa delle correnti di modo differenziale.



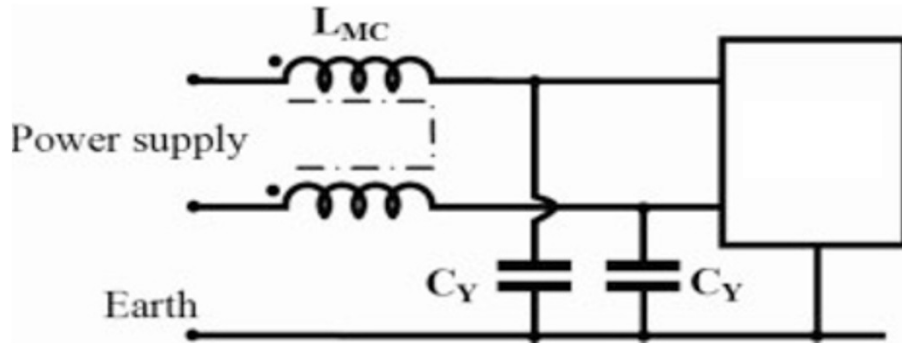
INDUTTORI DI MODO COMUNE

- Energia magnetica immagazzinata in due induttori mutuamente accoppiati:
- $W_M = \frac{1}{2}L_{11}i_1^2 + \frac{1}{2}L_{22}i_2^2 + L_{12}i_1i_2$
- Energia magnetica immagazzinata nell'induttore di modo comune della slide precedente:
- $W_M = \frac{1}{2}L_{MC}(i_1 + i_2)^2 = \frac{1}{2}L_{MC}i_1^2 + \frac{1}{2}L_{MC}i_2^2 + L_{MC}i_1i_2$
- Dalle due relazioni precedenti si comprende come due induttori (uno inserito in serie alla fase e uno in serie al neutro) mutuamente accoppiati con coefficiente di accoppiamento $k=L_{12}/\sqrt{(L_{11}L_{22})}=1$ (accoppiamento perfetto) producano un effetto equivalente all'induttore L_{MC} della slide precedente.



CONDENSATORI DI MODO COMUNE

Dalla slide precedente si ottiene che il filtro di modo comune ha la struttura rappresentata nella seguente figura:



Assumendo che vi sia un carattere di simmetria della fase e del neutro rispetto alla terra, per fare in modo che tale simmetria rimanga inalterata i due condensatori devono essere perfettamente uguali.

Tensione di modo comune:

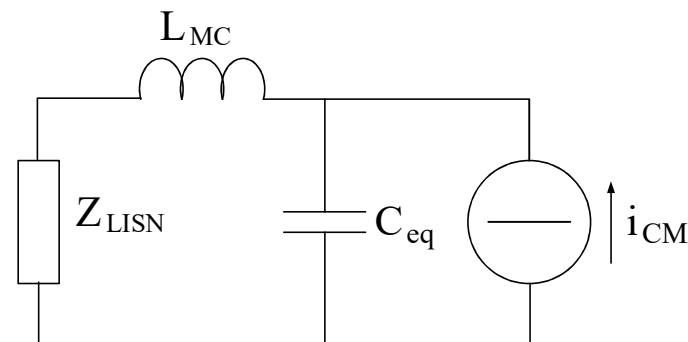
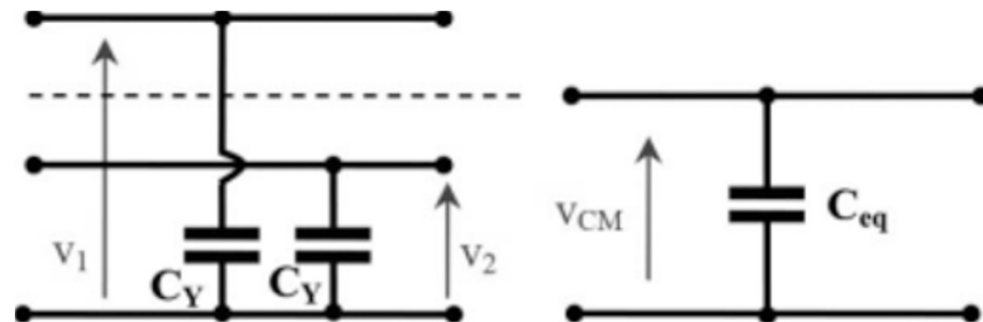
- $v_{CM} = \frac{v_1 + v_2}{2}$

Corrente di modo comune:

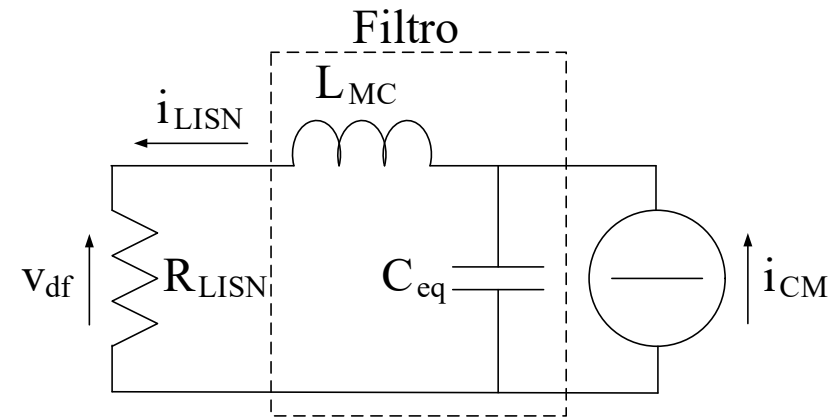
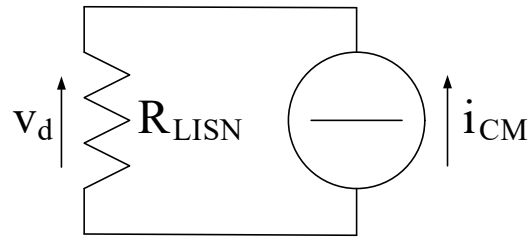
- $i_{CM} = i_{CY1} + i_{CY2}$
- $= C_Y \frac{dv_1}{dt} + C_Y \frac{dv_2}{dt}$
- $= 2C_Y \frac{d}{dt} \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)$

da cui risulta

- $C_{eq} = 2C_Y$



FILTRO DI MODO COMUNE E LISN IDEALI



$$\frac{V_{df}(s)}{V_d(s)} = \frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{1}{S^2 L_{MC} C_{eq} + S R_{LISN} C_{eq} + 1} = \frac{1}{S^2 / \omega_0^2 + 2\xi S / \omega_0 + 1} \quad (1)$$

Dal secondo e terzo membro della (1) risulta:

$$C_{eq} = \frac{2\xi}{\omega_0 R_{LISN}}, \quad L_{MC} = \frac{R_{LISN}}{2\xi \omega_0} \quad (2)$$

I valori del disturbo V_d e del limite ammesso per il disturbo filtrato $V_{df,lim}$ sono dati in $\text{dB}\mu\text{V}$ e quindi, ponendo $\xi=1$ e $s=j\omega$ nella (1), si ottiene

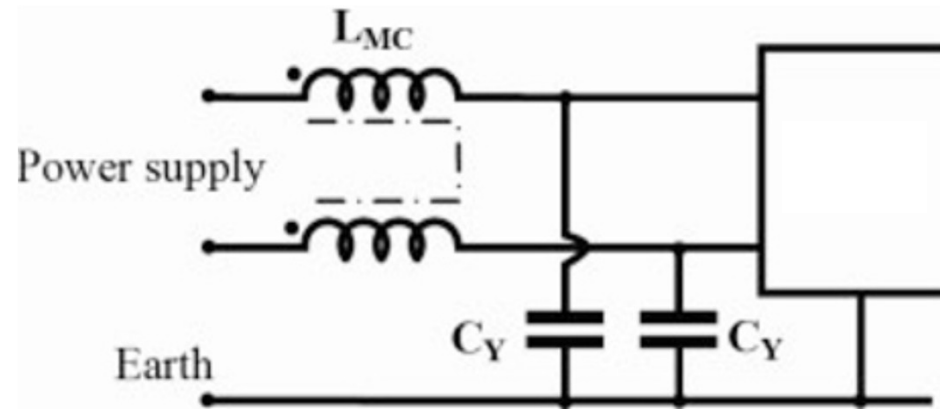
$$\frac{V_{df,lim}(j\omega)}{V_d(j\omega)} = 10^{\frac{V_{df,lim}(\omega)[\text{dB}\mu\text{V}] - V_d(\omega)[\text{dB}\mu\text{V}]}{20}} = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1} \quad (3)$$

Infine dalla (3) si ottiene

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\sqrt{10^{\frac{V_d(\omega)[\text{dB}\mu\text{V}] - V_{df,lim}(\omega)[\text{dB}\mu\text{V}]}{20} - 1}}} \quad (4)$$

A questo punto, ricordando di aver posto $\xi=1$ e sostituendo la (4) nelle (2), si ottengono dei valori ideali di L_{MC} e C_{eq} .

FILTRO DI MODO COMUNE NON IDEALE



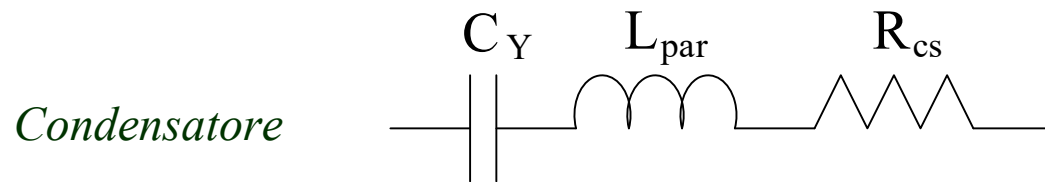
Condensatori ed induttori presenti nel semplice filtro di figura possono essere inizialmente considerati ideali. Tuttavia è poi necessario considerare che la funzione di trasferimento reale del filtro si discosta molto da quella ideale data dalla (1) della slide precedente.

Per conoscere il reale comportamento in frequenza del filtro, è necessario modellizzarlo mediante un circuito equivalente che tenga conto di diversi elementi parassiti. Quelli che influenzano maggiormente l'impedenza del filtro alle alte frequenze sono:

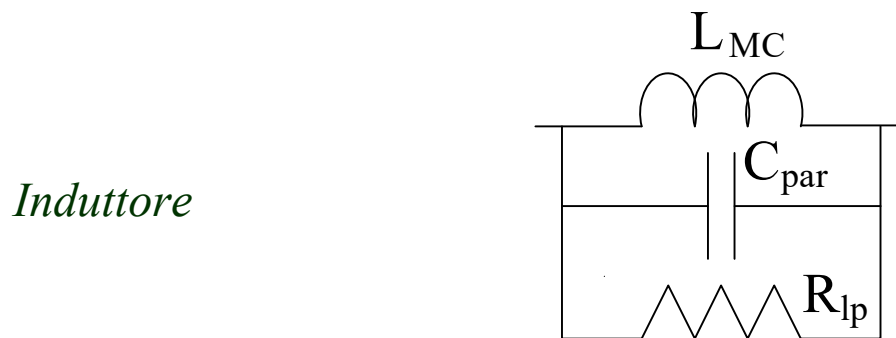
- l'induttanza parassita dei reofori e delle armature nei condensatori,
- la capacità parassita presente fra spire contigue negli induttori,
- la resistenza equivalente legata alle perdite nel ferro negli induttori,
- la resistenza dei reofori e delle armature metalliche nei condensatori.

COMPONENTI COMMERCIALI NON IDEALI

L'impedenza in funzione della frequenza di induttori e condensatori non ideali è influenzata soprattutto dall'induttanza parassita L_{par} e dalla resistenza equivalente serie R_{cs} (spesso indicata con ESR - equivalent series resistance) nei condensatori, dalla capacità parassita C_{par} e dalla resistenza parallelo R_{lp} (legata alle perdite nel ferro) negli induttori:



$$Z_{CY}(s) = \frac{S^2 L_{par} C_Y + S R_{cs} C_Y + 1}{S C_Y}$$



$$Z_{LMC}(s) = \frac{s L_{MC}}{S^2 L_{MC} C_{par} + S L_{MC} / R_{lp} + 1}$$

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DELL'INDUTTORE

Dati tre punti $Z_{LCM1}(\omega_1)$, $Z_{LCM2}(\omega_2)$, $Z_{LCM3}(\omega_3)$ della curva dell'impedenza in funzione della frequenza, si possono determinare i parametri L_{MC} , C_{par} e R_{lp} scrivendo il seguente sistema di tre equazioni in tre incognite:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{lp}^2} + \omega_1^2 C_{par}^2 + \frac{1}{\omega_1^2 L_{MC}^2} - 2 \frac{C_{par}}{L_{MC}} - \frac{1}{Z_{LCM1}^2} = 0 \\ \frac{1}{R_{lp}^2} + \omega_2^2 C_{par}^2 + \frac{1}{\omega_2^2 L_{MC}^2} - 2 \frac{C_{par}}{L_{MC}} - \frac{1}{Z_{LCM2}^2} = 0 \\ \frac{1}{R_{lp}^2} + \omega_3^2 C_{par}^2 + \frac{1}{\omega_3^2 L_{MC}^2} - 2 \frac{C_{par}}{L_{MC}} - \frac{1}{Z_{LCM3}^2} = 0 \end{cases}$$

Il sistema è non lineare, però può essere ridotto ad un sistema lineare di due equazioni in due incognite sostituendo nelle prime due equazioni:

$$\frac{1}{R_{lp}^2} - 2 \frac{C_{par}}{L_{MC}} = \frac{1}{Z_{LCM3}^2} - \omega_3^2 C_{par}^2 - \frac{1}{\omega_3^2 L_{MC}^2}$$

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DELL'INDUTTORE

Il sistema lineare ridotto a due equazioni in due incognite è

$$\begin{cases} (\omega_1^2 - \omega_3^2)C_{par}^2 + \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_3^2}\right) \frac{1}{L_{MC}^2} - \frac{1}{Z_{LCM1}^2} + \frac{1}{Z_{LCM3}^2} = 0 \\ (\omega_2^2 - \omega_3^2)C_{par}^2 + \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_3^2}\right) \frac{1}{L_{MC}^2} - \frac{1}{Z_{LCM2}^2} + \frac{1}{Z_{LCM3}^2} = 0 \end{cases},$$

da cui risulta: $L_{MC} = \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_3}\right)^2\right]}{\frac{(\omega_2^2 - \omega_3^2)}{Z_{LCM1}^2} + \frac{(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{Z_{LCM2}^2} + \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{Z_{LCM3}^2}}}$,

$$C_{par} = \sqrt{\frac{1}{(\omega_1^2 - \omega_3^2) \left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right] Z_{LCM1}^2} + \frac{1}{(\omega_2^2 - \omega_1^2) \left[1 - \left(\frac{\omega_3}{\omega_2}\right)^2\right] Z_{LCM2}^2} + \frac{1}{(\omega_3^2 - \omega_2^2) \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_3}\right)^2\right] Z_{LCM3}^2}}$$

Ricavati L_{MC} e C_{par} , si ottiene $R_{lp} = \frac{1}{\sqrt{2 \frac{C_{par}}{L_{MC}} + \frac{1}{Z_{LCM3}^2} - \omega_3^2 C_{par}^2 - \frac{1}{\omega_3^2 L_{MC}^2}}}$.

ESEMPIO PARAMETRI INDUTTORE COMMERCIALE

Ad esempio dalla curva dell'impedenza in funzione della frequenza del prodotto commerciale DTS-25/1.5/15-CC, si ricava:

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 10^5 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{LCM1} = 1160 \Omega,$$

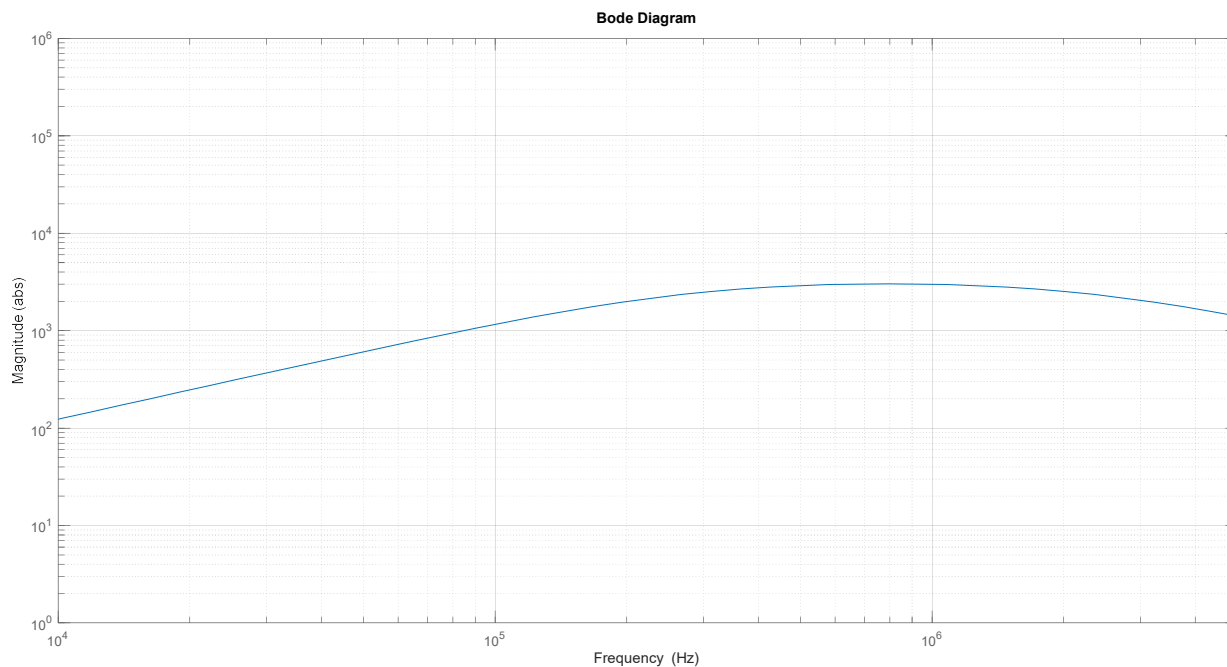
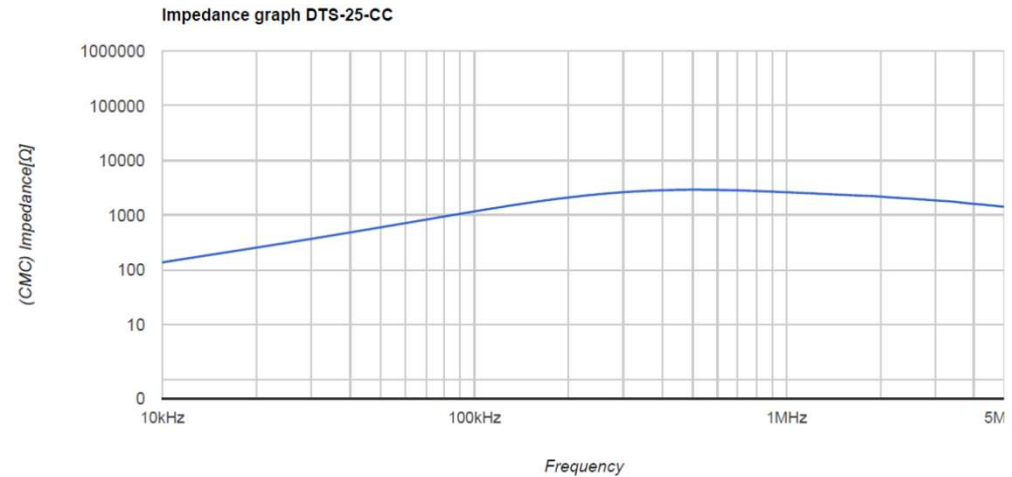
$$\omega_2 = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^5 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{LCM2} = 2580 \Omega,$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{LCM3} = 1410 \Omega.$$

Dati i tre punti ricavati, si ottiene:

$$L_{MC} = 2.0 \text{ mH},$$

$$C_{par} = 19 \text{ pF}, R_{lp} = 2.6 \text{ k}\Omega.$$



DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEL CONDENSATORE

In maniera analoga e duale rispetto a quanto visto per l'induttore, dati tre punti $Z_{CY1}(\omega_1)$, $Z_{CY2}(\omega_2)$, $Z_{CY3}(\omega_3)$ della curva dell'impedenza in funzione della frequenza, si possono determinare i parametri C_Y , L_{par} e R_{cs} scrivendo il seguente sistema di tre equazioni in tre incognite:

$$\begin{cases} R_{cs}^2 + \omega_1^2 L_{par}^2 + \frac{1}{\omega_1^2 C_Y^2} - 2 \frac{L_{par}}{C_Y} - Z_{CY}^2 = 0 \\ R_{cs}^2 + \omega_2^2 L_{par}^2 + \frac{1}{\omega_2^2 C_Y^2} - 2 \frac{L_{par}}{C_Y} - Z_{CY2}^2 = 0 \\ R_{cs}^2 + \omega_3^2 L_{par}^2 + \frac{1}{\omega_3^2 C_Y^2} - 2 \frac{L_{par}}{C_Y} - Z_{CY}^2 = 0 \end{cases}$$

Anche in questo caso il sistema non lineare può essere ridotto ad un sistema lineare di due equazioni in due incognite sostituendo:

$$R_{cs}^2 - 2 \frac{L_{par}}{C_Y} = Z_{CY3}^2 - \omega_3^2 L_{par}^2 - \frac{1}{\omega_3^2 C_Y^2}$$

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEL CONDENSATORE

Il sistema lineare ridotto a due equazioni in due incognite è

$$\begin{cases} (\omega_1^2 - \omega_3^2)L_{par}^2 + \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_3^2}\right)\frac{1}{C_Y^2} - Z_{CY1}^2 + Z_{CY3}^2 = 0 \\ (\omega_2^2 - \omega_3^2)L_{par}^2 + \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_3^2}\right)\frac{1}{C_Y^2} - Z_{CY}^2 + Z_{CY3}^2 = 0 \end{cases},$$

da cui risulta: $C_Y = \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_3}\right)^2\right]}{(\omega_2^2 - \omega_3^2)Z_{CY1}^2 + (\omega_3^2 - \omega_1^2)Z_{CY2}^2 + (\omega_1^2 - \omega_2^2)Z_{CY3}^2}}$,

$$L_{par} = \sqrt{\frac{Z_{CY1}^2}{(\omega_1^2 - \omega_3^2)\left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right]} + \frac{Z_{CY}^2}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)\left[1 - \left(\frac{\omega_3}{\omega_2}\right)^2\right]} + \frac{Z_{CY}^2}{(\omega_3^2 - \omega_2^2)\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_3}\right)^2\right]}.$$

Ricavati C_Y e L_{par} , si ottiene $R_{cs} = \sqrt{2\frac{L_{par}}{C_Y} + Z_{CY3}^2 - \omega_3^2 L_{par}^2 - \frac{1}{\omega_3^2 C_Y^2}}$.

ESEMPIO PARAMETRI COND. COMMERCIALE

Dalla curva dell'impedenza in funzione della frequenza del condensatore commerciale TDK-32923H3105, si ricava:

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 9 \cdot 10^4 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{CY1} = 2.0 \ \Omega,$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot 10^6 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{CY2} = 0.1 \ \Omega,$$

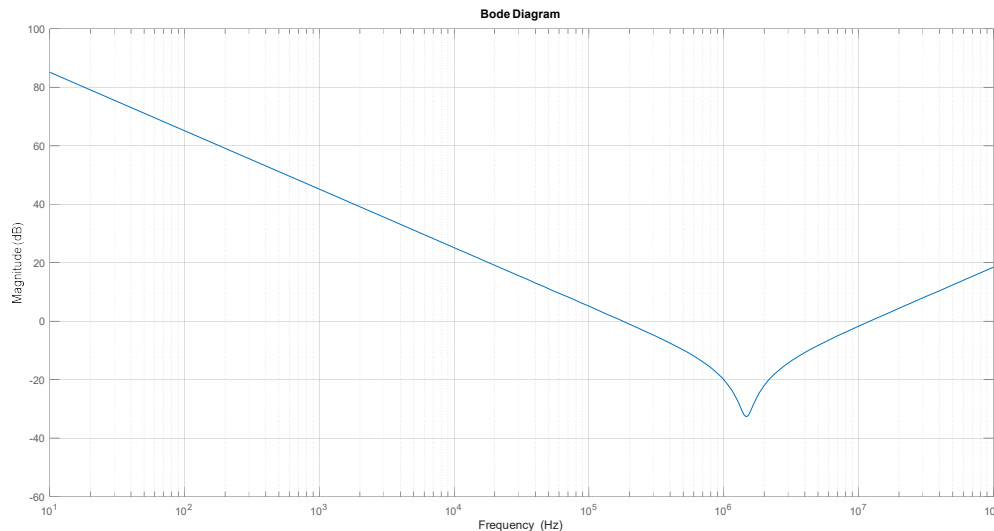
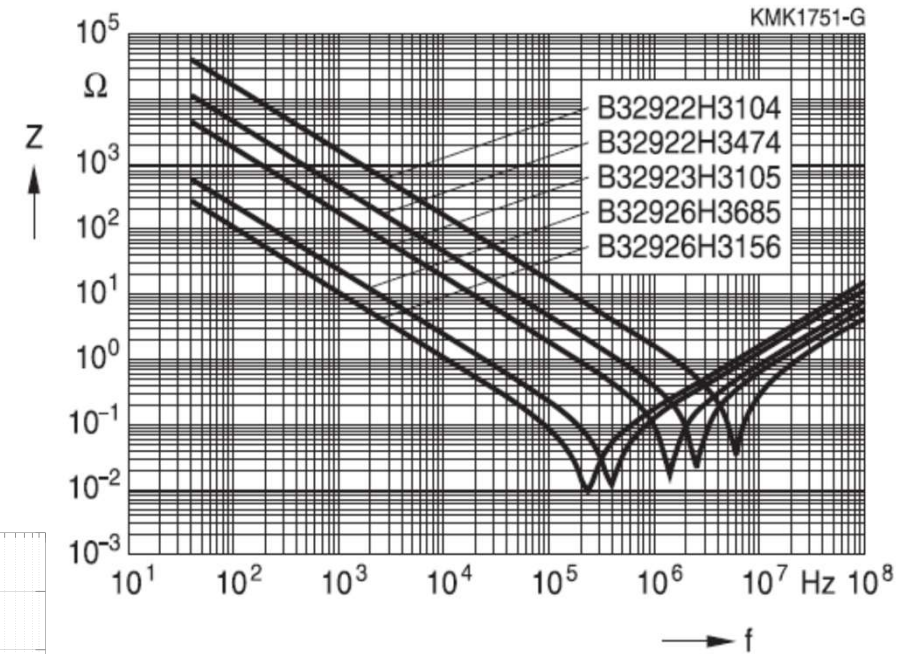
$$\omega_3 = 2\pi \cdot 6 \cdot 10^7 \text{ rad/s} \Rightarrow Z_{CY3} = 5.0 \ \Omega.$$

Dati i tre punti ricavati, si ottiene:

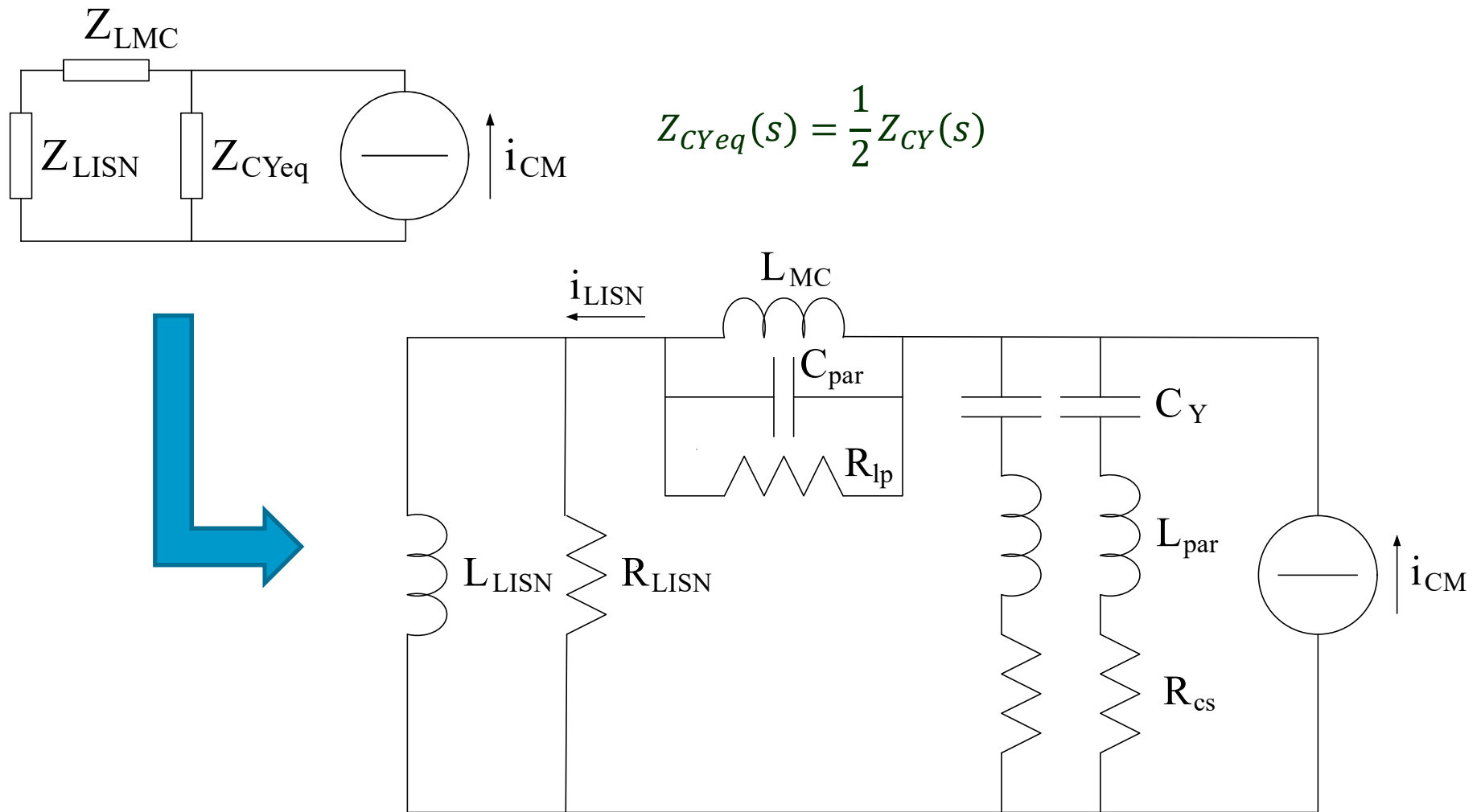
$$C_Y = 880 \text{ nF},$$

$$L_{par} = 13 \text{ nH}, R_{cs} = 23 \text{ m}\Omega.$$

Impedance Z versus frequency f
(typical values)



STUDIO DEL FILTRO DI MODO COMUNE REALE

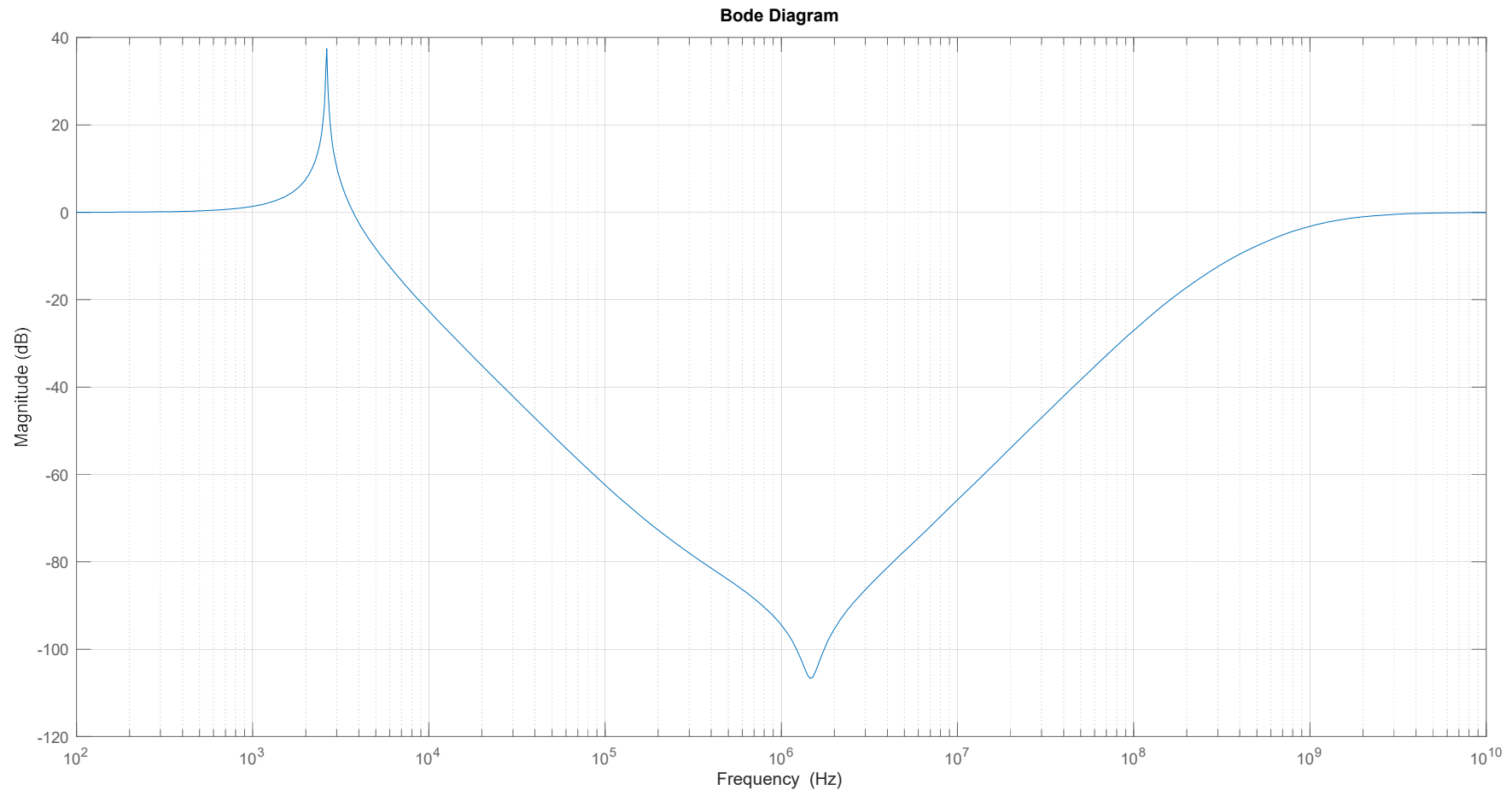


I circuiti di figura costituiscono un modello in grado di prevedere con sufficiente approssimazione l'attenuazione dei disturbi operata dal filtro di modo comune al variare della frequenza.

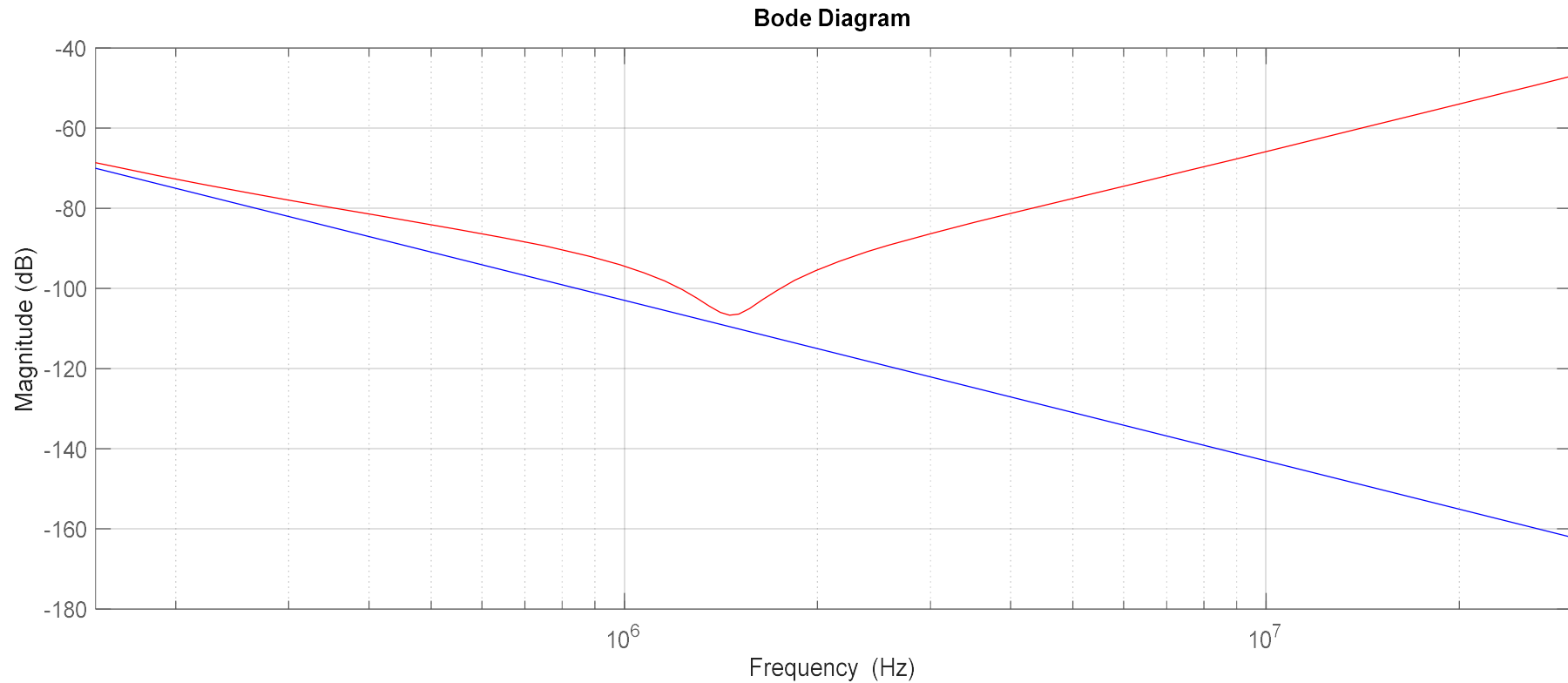
GUADAGNO DEL FILTRO DI MODO COMUNE REALE

Dai circuiti della slide precedente si ottiene:

$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{Z_{CYeq}(s)}{Z_{LMC}(s) + Z_{LISN}(s) + Z_{CYeq}(s)} = \frac{\frac{S^2 L_{par} C_Y + S R_{cs} C_Y + 1}{S^2 C_Y}}{\frac{S^2 L_{par} C_Y + S R_{cs} C_Y + 1}{S^2 C_Y} + \frac{S L_{MC}}{S^2 L_{MC} C_{par} + S L_{MC} / R_{lp} + 1} + \frac{S L_{LISN}}{S L_{LISN} / R_{LISN} + 1}}$$



CONFRONTO TRA FILTRO DI M.C. REALE E IDEALE



Attenuazione dei disturbi fra 150kHz e 30MHz ottenuta con il filtro ideale (curva blu) e con il filtro reale (curva rossa).

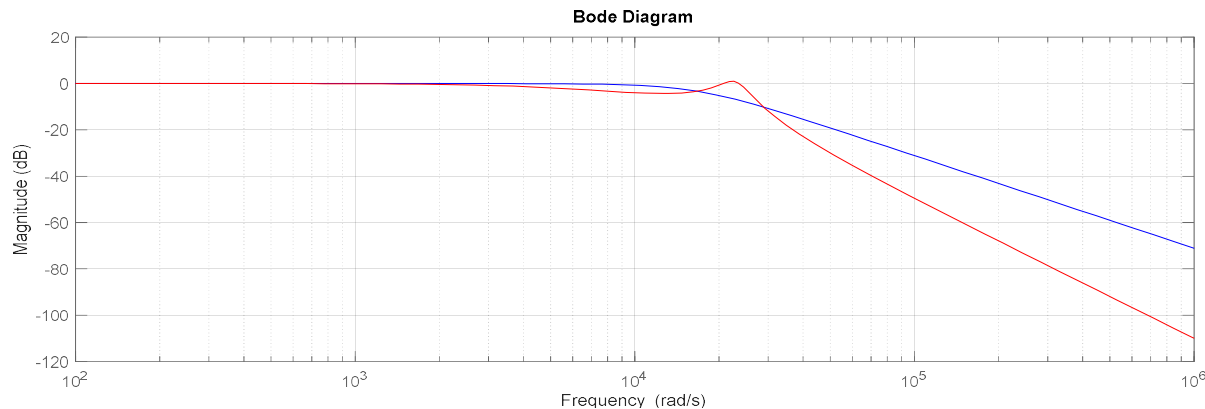
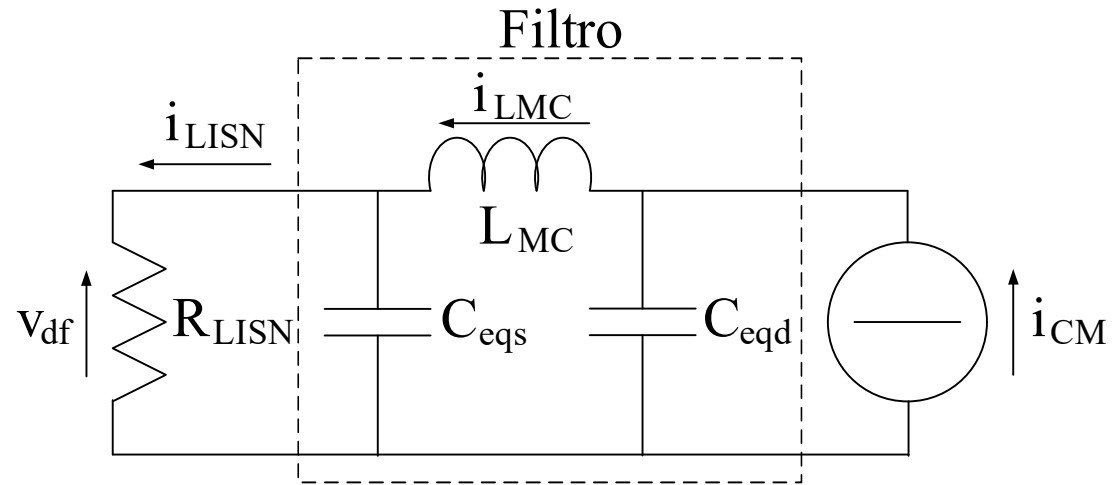
FILTRO DI M.C. A Π IDEALE

Se il semplice filtro studiato in precedenza non è sufficiente a ridurre i disturbi di modo comune al di sotto della soglia prescritta dalle norme, si può ricorrere ad un filtro di ordine superiore, cosiddetto a π , ottenuto aggiungendo un condensatore a valle dell'induttore, ottenendo:

$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{LMC}(s)} = \frac{1}{1 + SR_{LISN}C_{eqs}} \quad (5)$$

Si nota che l'equazione (5) rappresenta un filtro del primo ordine, che si aggiunge in cascata a quello precedente. La funzione di trasferimento complessiva del filtro ideale a π è del terzo ordine e risulta:

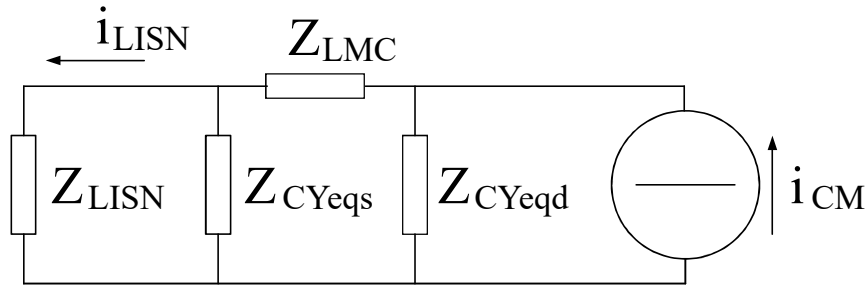
$$\frac{V_{df}(s)}{V_d(s)} = \frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{1}{S^3 L_{MC} C_{eqd} C_{eqs} R_{LISN} + S^2 L_{MC} C_{eqd} + SR_{LISN} (C_{eqd} + C_{eqs}) + 1} \quad (6)$$



Curva blu: filtro del 2° ordine;

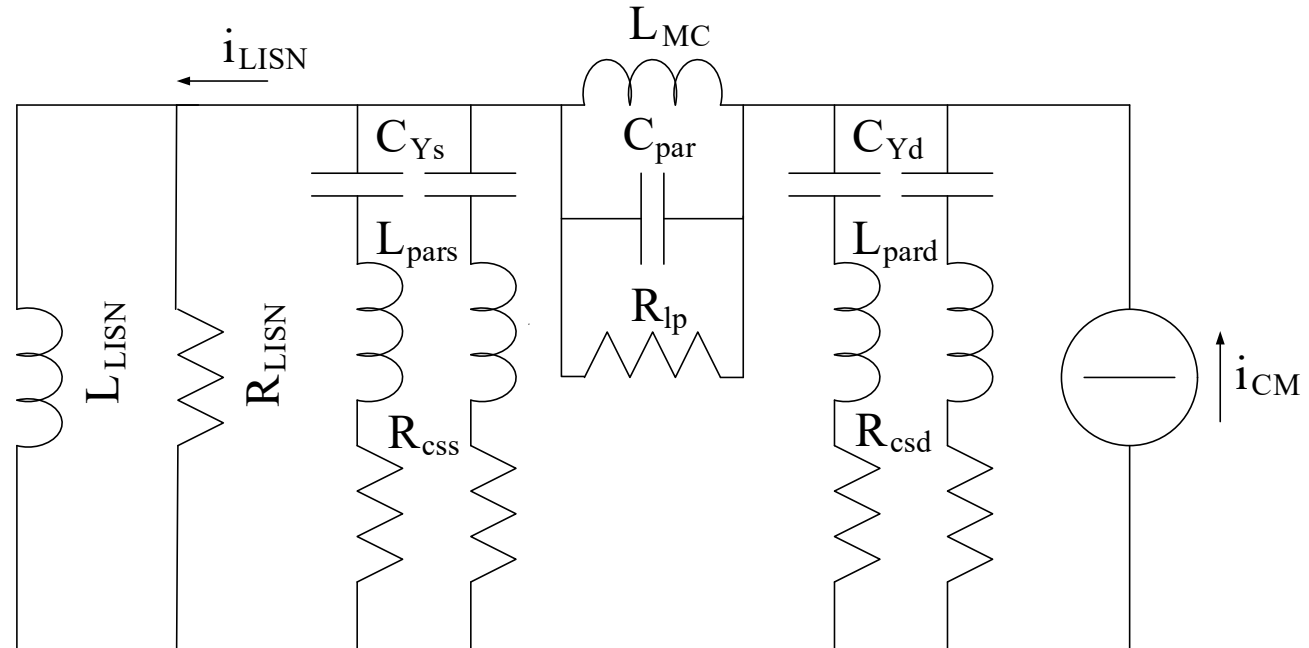
Curva rossa: filtro del 3° ordine.

FILTRO DI M.C. A Π REALE



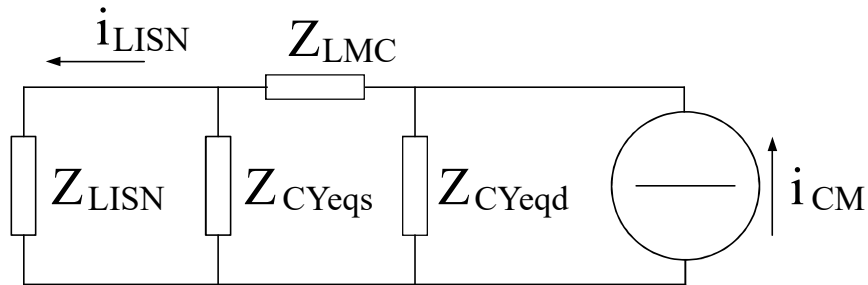
$$Z_{CYeqd}(s) = \frac{1}{2} Z_{CYd}(s)$$

$$Z_{CYeqs}(s) = \frac{1}{2} Z_{CYs}(s)$$



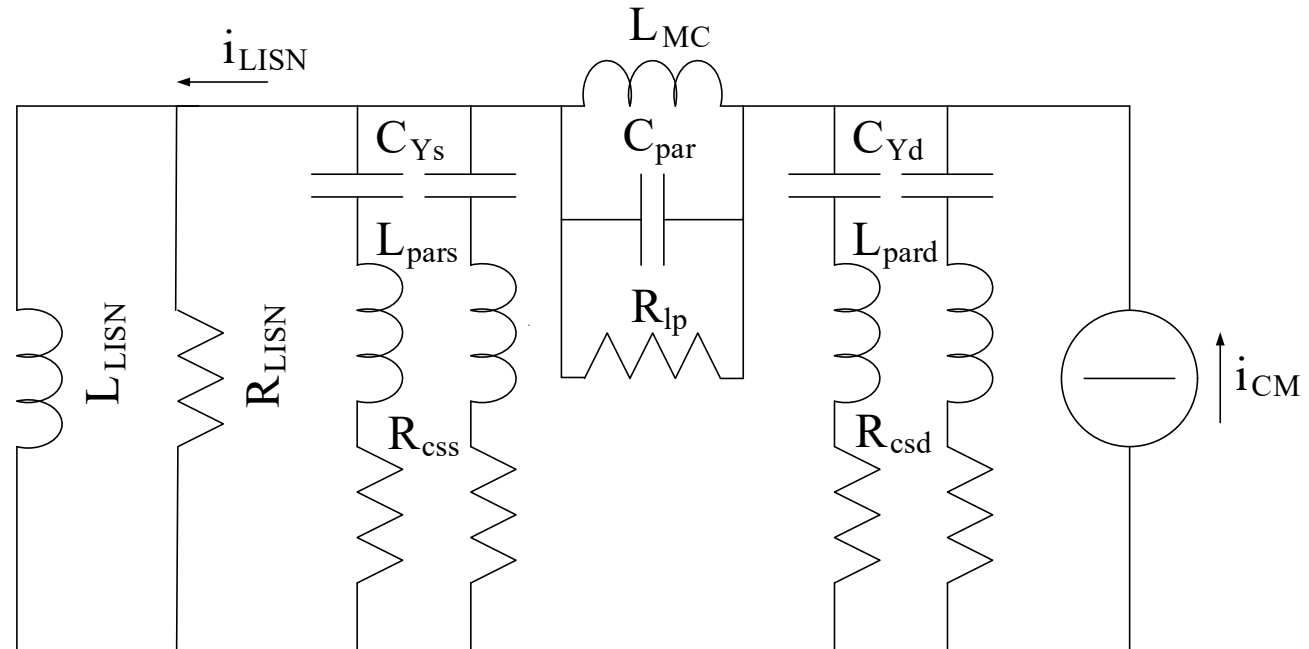
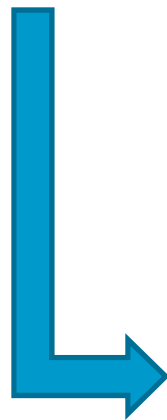
$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{1}{\frac{Z_{LISN}(s)Z_{LMC}(s)}{Z_{CYeqd}(s)Z_{CYeqs}(s)} + \frac{Z_{LISN}(s)+Z_{LMC}(s)}{Z_{CYeqd}(s)} + \frac{Z_{LISN}(s)}{Z_{CYeqs}(s)} + 1}$$

FILTRO DI M.C. A Π REALE



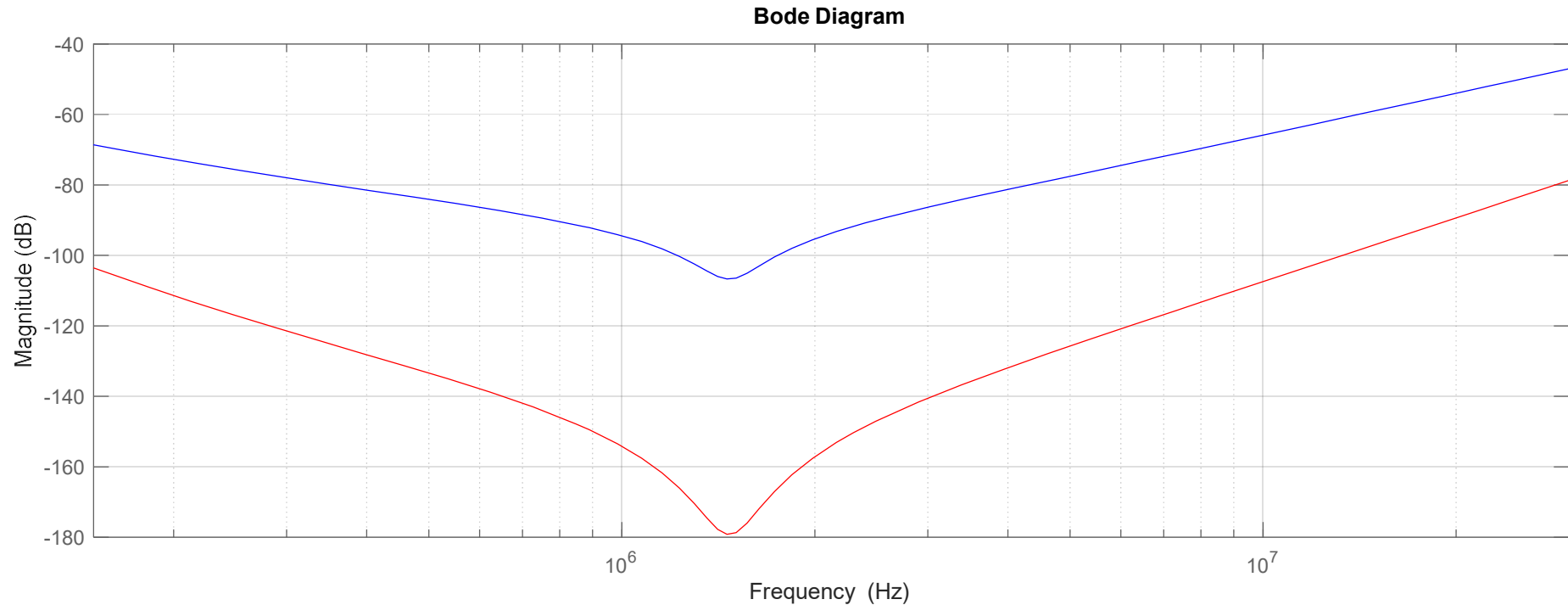
$$Z_{CYeqd}(s) = \frac{1}{2} Z_{CY}(s)$$

$$Z_{CYe}(s) = \frac{1}{2} Z_{CYS}(s)$$



$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{1}{\frac{Z_{LISN}(s)Z_{LMC}(s)}{Z_{CYeqd}(s)Z_{CYeqs}(s)} + \frac{Z_{LISN}(s)+Z_{LMC}(s)}{Z_{CYeqd}(s)} + \frac{Z_{LISN}(s)}{Z_{CYeqs}(s)} + 1}$$

CONFRONTO TRA FILTRO SEMPLICE E FILTRO A Π



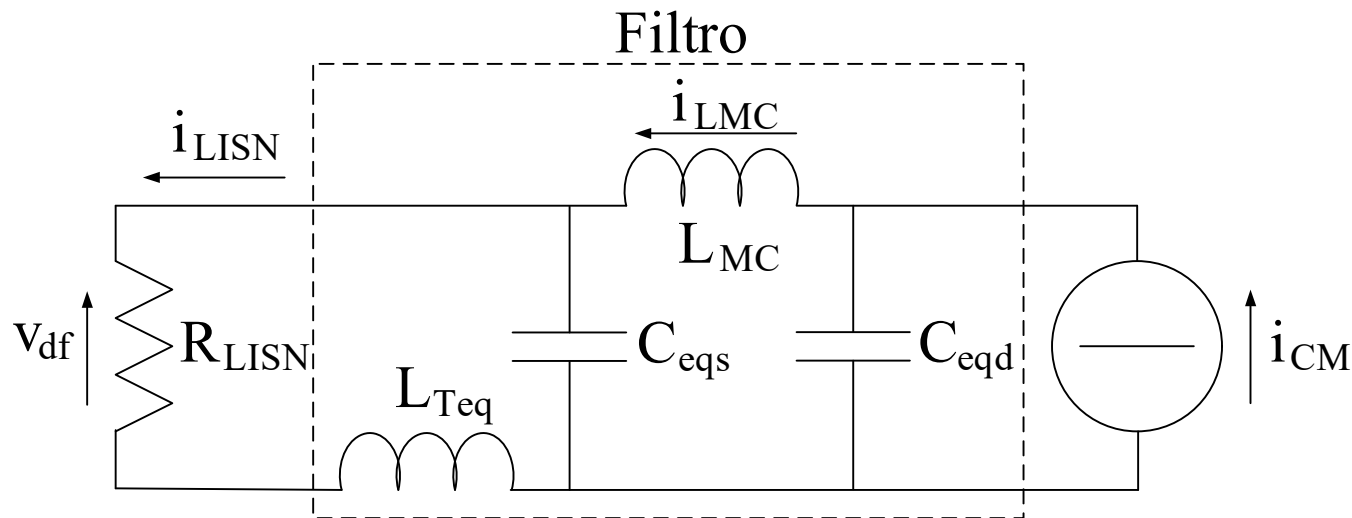
Attenuazione dei disturbi fra 150kHz e 30MHz ottenuta con il filtro di modo comune semplice (curva blu) e con il filtro di modo comune a π (curva rossa).

PICCOLA INDUTTANZA IN SERIE AL FILO DI TERRA

Un'ulteriore attenuazione dei disturbi rispetto al filtro a π può essere ottenuta inserendo una piccola induttanza L_T in serie al filo di terra, a valle del filtro a π . In questo modo la (5) diventa:

$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{LMC}(s)} = \frac{1}{S^2 L_{Teq} C_{eqs} + S R_{LISN} C_{eqs} + 1} \quad (7)$$

dove $L_{Teq} = 2 L_T$.

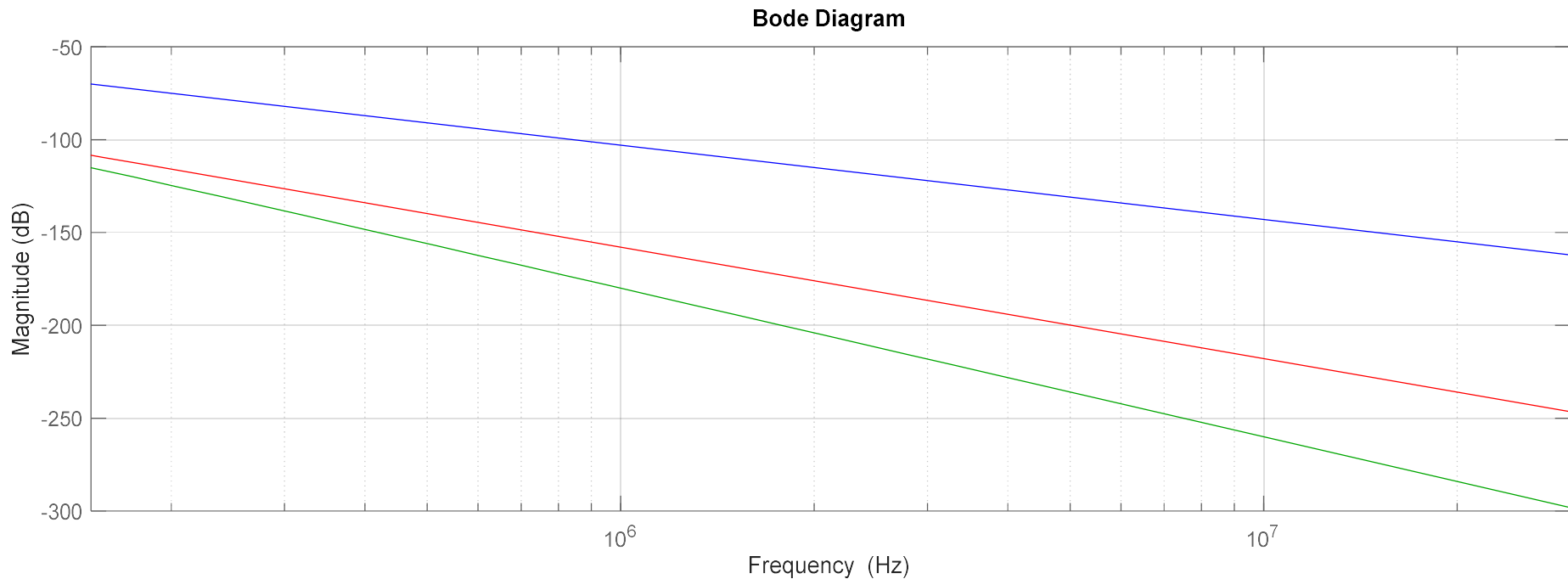


Questa soluzione però potrebbe non essere compatibile con la sicurezza delle persone e delle apparecchiature, perché andrebbe ad interporre un'impedenza sulla messa a terra delle parti metalliche.

PICCOLA INDUTTANZA IN SERIE AL FILO DI TERRA

L'equazione (7) rappresenta un filtro del secondo ordine, che si aggiunge in cascata a quello dato dalla (1). La funzione di trasferimento complessiva del filtro ideale è del quarto ordine e risulta:

$$\frac{I_{LISN}(s)}{I_{CM}(s)} = \frac{1}{S^4 L_{MC} L_{Teq} C_{eqd} C_{eqs} + S^3 L_{MC} C_{eqd} C_{eqs} R_{LISN} + S^2 [L_{MC} C_{eqd} + L_{Teq} (C_{eqd} + C_{eqs})] + S R_{LISN} (C_{eqd} + C_{eqs}) + 1}$$



Attenuazione dei disturbi fra 150kHz e 30MHz ottenuta con il filtro di modo comune ideale semplice (curva blu), a π (curva rossa), del 4° ordine con $L_{Teq} = 0.05 * L_{MC}$ (curva verde).