

CONSIDERAZIONI SUI TRASFORMATORI DI BASSA FREQUENZA

di P. Soati

Sappiamo che un trasformatore consiste in un nucleo di materiale magnetico su cui sono avvolti due avvolgimenti, il primario ed il secondario, con accoppiamento il più stretto possibile, di modo che applicando una tensione al circuito primario circolerà in esso una corrente che darà luogo ad un flusso magnetico il quale induce una forza elettromotrice in ciascuno dei due avvolgimenti. Non ci dilunghiamo nel prendere in considerazione il comportamento delle tensioni e delle correnti che circolano nei due avvolgimenti essendo già stato l'argomento trattato in altra occasione, analizzeremo invece il comportamento dei trasformatori di bassa frequenza in relazione ai fenomeni di distorsione e della risposta in frequenza.

DISTORSIONE NEI TRASFORMATORI DI B.F.

Se si trascurano le perdite che sono proprie di un trasformatore, si può affer-

mare che il flusso provocato dall'applicazione di una tensione alternata al circuito primario dà luogo ad una forza elettromotrice nel primario stesso che ha un valore tale da equilibrare la tensione applicata.

Tenuto conto che questo equilibrio si deve mantenere istante per istante ne consegue che la forza contro elettromotrice del primario, e di conseguenza anche la forza elettromotrice del secondario, hanno una forma uguale a quella della tensione primaria.

Applicando al primario una tensione sinusoidale si può dimostrare che anche l'andamento del flusso magnetico assume una forma sinusoidale. Se però si tiene conto che le caratteristiche di magnetizzazione dei materiali magnetici non sono lineari desiderando ottenere un flusso sinusoidale la corrente di magnetizzazione, come indica la figura 2, anziché essere sinusoidale dovrà essere alquanto distorta. Di conseguenza quando un trasformatore è alimentato mediante una tensione

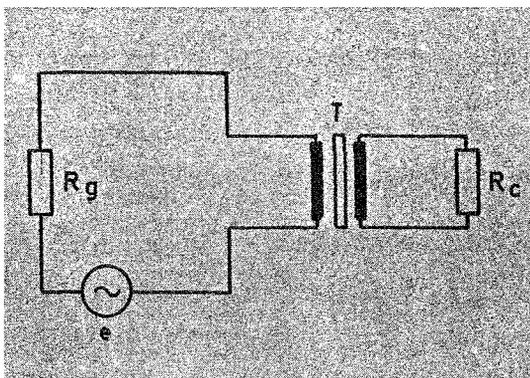


Fig. 1 - Trasformatore sotto carico. e = f.e.m. del generatore; R_g = impedenza Interna del generatore; R_c = carico.

sinusoidale la tensione del secondario ha anch'essa una forma sinusoidale mentre risulta distorta la corrente assorbita a vuoto.

Se però si prendono in considerazione le resistenze degli avvolgimenti e le induttanze di dispersione, si può constatare che esse danno luogo a delle cadute di tensione, che hanno la stessa forma della corrente dalla quale sono percorsi, che, come abbiamo precisato più sopra è distorta, e di conseguenza anche la forza contro elettromotrice del primario, il flusso e la forza elettromotrice secondaria risulteranno leggermente distorte. Questo è il caso comune che si riscontra quando un trasformatore è alimentato con

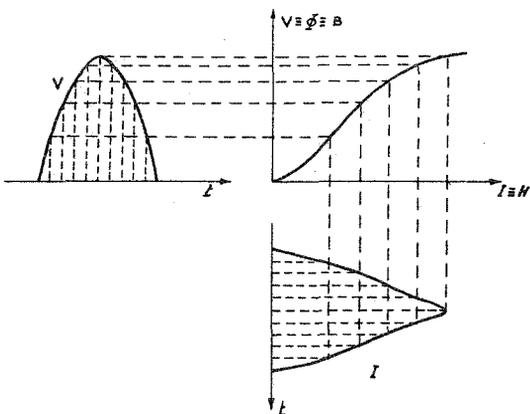


Fig. 2 - Andamento della corrente di magnetizzazione per ottenere un flusso sinusoidale.

un generatore di tensione avente una impedenza interna nulla.

Ammettiamo invece che il trasformatore sia alimentato da un generatore che presenti una elevata impedenza interna, cioè da un generatore a corrente costante, e supponiamo che la corrente erogata abbia una forma sinusoidale e che il trasformatore non sia caricato.

In queste condizioni dovendo essere la corrente di magnetizzazione sinusoidale, il flusso e la forza elettromotrice del primario e del secondario non risulteranno sinusoidali bensì distorti come è mostrato dal grafico di figura 3. In altre parole si può affermare che quando il trasformatore è alimentato da un generatore la cui impedenza interna è vicina allo zero la distorsione delle tensioni, che è dovuta alla resistenza ed alla induttanza dispersa degli avvolgimenti è trascurabile mentre se il trasformatore viene alimentato mediante un generatore avente una impedenza interna molto elevata, cioè mediante un generatore del tipo a corrente costante, la distorsione della tensione è molto elevata.

Ora se è ben vero che non è possibile ottenere dei generatori i quali presentino una impedenza nulla (e neanche infinita) è facile comprendere che comunque la distorsione delle tensioni è tanto più elevata quanto maggiore è l'impedenza del generatore. Da quanto abbiamo esposto se ne ricava che è sempre conveniente alimentare i trasformatori di bassa frequenza con amplificatori che abbiano una forte contoreazione di tensione i quali, come è ben noto, si comportano come dei generatori aventi una impedenza interna particolarmente bassa.

Dato che in questo caso le tensioni del primario e del secondario sono entrambe sinusoidali anche la corrente secondaria, purché il carico sia lineare, avrà tale forma.

La corrente primaria di reazione, dovendo equilibrare la forza magnetomotrice prodotta dalla corrente secondaria, avrà anch'essa una forma sinusoidale che componendosi con la corrente di magnetizzazione, che è distorta, darà luogo ad una corrente che sarà notevolmente meno distorta della corrente assorbita a

vuoto, cioè della corrente magnetizzante. Essa sarà percentualmente meno distorta quanto più bassa sarà l'impedenza del carico.

Nei casi in cui un trasformatore sia alimentato con generatore a forte impedenza interna si può rilevare che la somma delle correnti di magnetizzazione e di reazione dovrà avere una forma sinusoidale di modo che la loro distorsione sarà complementare. Se però si diminuisce l'impedenza di carico la corrente di magnetizzazione diverrà del tutto trascurabile rispetto a quella di reazione e pertanto questa avrà tendenza a diventare sinusoidale e di conseguenza, nel caso di un carico lineare, la tensione secondaria avrà una forma identica.

Pertanto caricando un trasformatore la sua distorsione diminuisce qualunque sia l'impedenza interna del generatore.

Le suddette considerazioni ci permettono di affermare che i trasformatori a vuoto distorcono maggiormente dei trasformatori caricati.

È evidente dunque che le misure di distorsione relative ai trasformatori di bassa frequenza devono essere accompagnate dal valore dell'impedenza interna del generatore che è stato utilizzato per effettuare la misura e dal carico sul quale è stato chiuso il secondario, altrimenti l'indicazione della misura è priva di qualsiasi significato.

In genere si ritiene che il carico sia quello normale di lavoro del trasformatore e l'impedenza interna sia uguale a quella del carico riportata al primario.

Qualora il generatore abbia una impedenza interna minore di quella necessaria è sufficiente aggiungere in serie al generatore stesso una impedenza avente il valore pari alla differenza tra le due impedenze mentre se invece l'impedenza interna del generatore è superiore al valore richiesto è opportuno collegare in parallelo al generatore stesso una impedenza che consenta di ottenere il valore richiesto.

In pratica l'impedenza interna di un generatore può essere stabilita caricando il generatore stesso in modo che la tensione di uscita si riduca di 6 dB, cioè diventi la metà, passando dalle condizioni a vuoto a quelle di carico. In queste con-

dizioni l'impedenza di carico sarà uguale a quella interna.

È altrettanto utile vedere come vari la distorsione in funzione del livello della tensione applicata.

Quando si varia la tensione applicata ad un trasformatore varierà naturalmente, nella identica misura, anche la forza contro elettromotrice che la deve equilibrare, e di conseguenza anche il flusso magnetico: ciò provoca una alterazione della caratteristica di magnetizzazione. È dunque evidente che in questo caso il comportamento della distorsione dipende dalla caratteristica di magnetizzazione.

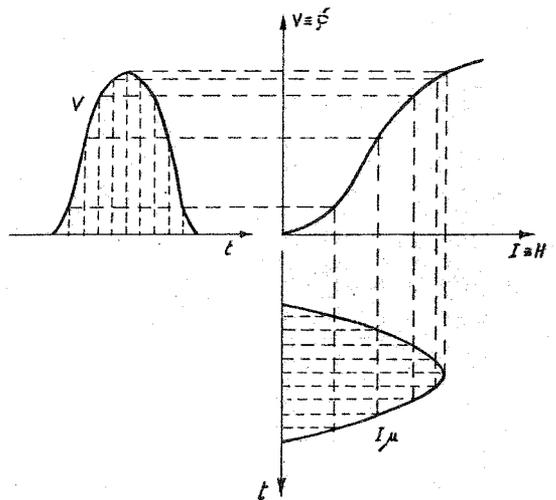


Fig. 3 - Grafico che mette in evidenza la distorsione del flusso e delle tensioni per una corrente magnetizzante sinusoidale.

A questo proposito si deve tenere presente che le caratteristiche di magnetizzazione dei materiali magnetici possono essere suddivise in tre gruppi: il primo, visibile in figura 4a, con ginocchio nella parte iniziale della curva, il secondo, figura 4b, con ginocchio nella parte superiore della curva (saturazione) ed il terzo con ambedue i ginocchi, cioè in basso ed in alto come è mostrato dalla figura 4c.

Nella curva di figura 4a si può constatare che quando i livelli sono elevati, la distorsione è poco sentita ed aumenta con il diminuire del livello perché si manifesta nel tratto curvilineo inferiore. Quando i livelli sono molto bassi si inte-

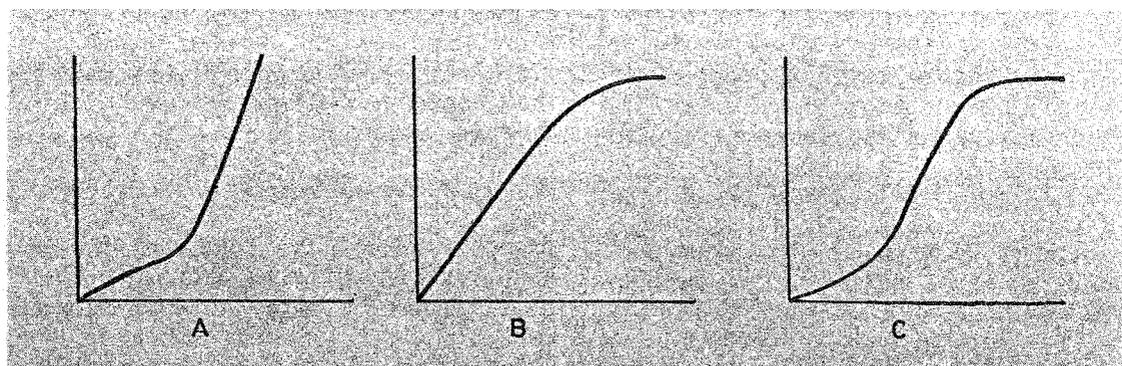


Fig. 4 - Caratteristiche di magnetizzazione dei materiali magnetici, A = con ginocchio inferiore, B = con ginocchio superiore, C = con ginocchi inferiore e superiore.

ressa la prima parte rettilinea della caratteristica e di conseguenza la distorsione diminuisce di nuovo.

In questo caso si viene ad avere la massima distorsione per i livelli medi; è questa una caratteristica propria dei materiali costituiti da permoloy, ferro dolce e materiali similari.

Per quanto concerne la figura 4b si nota che la distorsione si manifesta per saturazione nei livelli elevati e che diminuisce con il diminuire della tensione applicata; pertanto a dei livelli medi e bassi la distorsione è da ritenere trascurabile.

Si tratta di una distorsione che in genere si riesce in parte a ridurre notevolmente aumentando il numero di spire, senza però aumentare eccessivamente le induttanze di dispersione e la resistenza. In genere si riesce ad ottenere che anche con livelli molto elevati non si raggiunga il punto di saturazione della curva.

Il terzo caso, rappresentato in figura 4c è caratteristico dei materiali che danno luogo a notevoli distorsioni sia ai livelli elevati sia a quelli bassi e medi. Da quanto abbiamo esposto risulta evidente che la migliore delle caratteristiche è quella rappresentata in figura 4b che è propria del numetal e di altri materiali similari.

Quest'ultima soluzione è consigliata anche dal fatto che i livelli molto elevati si hanno all'uscita degli amplificatori di potenza ed in questo caso i trasformatori possono essere alimentati con dei generatori aventi una bassa impedenza interna, cioè mediante degli amplificatori con controreazione di tensione.

Quanto abbiamo detto ci permette dunque di ampliare la definizione di distorsione di un trasformatore di bassa frequenza, precisando che la distorsione di un trasformatore deve essere misurata per i vari livelli che interessano.

Bisogna altresì tenere presente che lasciando invariato il livello della tensione ma aumentandone la sua frequenza si ha una riduzione proporzionale del flusso magnetico e quindi una diminuzione della corrente magnetizzante la quale come abbiamo detto è causa di distorsione.

Pertanto ne deriva che la massima distorsione in un trasformatore di bassa frequenza si riscontra sulla frequenza più bassa (che nel campo audio varia da 20 a 30 Hz) e che di conseguenza le misure di distorsione devono essere effettuate a tale frequenza.

RISPOSTA DI FREQUENZA DEI TRASFORMATORI DI BASSA FREQUENZA

Tutti i trasformatori di bassa frequenza, malgrado i notevoli perfezionamenti che la tecnica moderna ha consentito di apportare ai processi costruttivi, non riescono a dare una curva di risposta perfettamente uniforme su tutto il campo di frequenze udibili. I maggiori inconvenienti si riscontrano alle due estremità della gamma cioè nelle frequenze basse ed in quelle alte.

Esaminiamo brevemente il comportamento dei trasformatori di b.f. alle frequenze basse, a quelle medie ed alle frequenze alte.

Basse frequenze

Quando la frequenza acustica diminuisce il flusso magnetico, e di conseguenza la corrente magnetizzante aumenta notevolmente e quindi è tutt'altro che trascurabile nei confronti della corrente di carico.

Il circuito caratteristico in questo caso anziché quello di figura 5 (nel quale un trasformatore con carico fortemente induttivo diventa pochissimo induttivo quando è caricato con un carico ohmico), si trasforma nel circuito di figura 6.

Ammettiamo che il suddetto circuito sia alimentato da un generatore che abbia una forza elettromotrice E con una impedenza R_i e che il secondario del trasformatore sia aperto cioè con impedenza infinita. Diminuendo la frequenza aumenterà pure la corrente magnetizzante e di conseguenza si avrà una caduta della impedenza interna R_i .

In conseguenza di ciò la tensione ai capi della induttanza magnetizzante L_m e di conseguenza la tensione al secondario diminuirà rapidamente. Se l'impedenza interna R_i fosse praticamente nulla, cioè con un generatore a tensione costante, la tensione al secondario resterebbe invariata anche alle frequenze basse.

Possiamo pertanto affermare che quanto è maggiore l'impedenza interna del generatore, tanto più forte è la perdita di tensione via via che diminuisce la frequenza.

Se si carica il secondario la corrente che viene assorbita dal trasformatore è data dalla somma vettoriale della corrente assorbita dal carico e dalla corrente di magnetizzazione (ciò indipendentemente dalla frequenza).

In tal caso l'impedenza interna R_i del generatore subirà una caduta notevolmente elevata ma nello stesso tempo risulterà molto più costante al variare della frequenza; ciò per il fatto che la corrente assorbita è indipendente, almeno in massima parte, dalla frequenza.

Ne risulta perciò che più bassa è l'impedenza del carico minori sono le perdite di tensioni che si notano passando dalla gamma delle frequenze medie a quella delle frequenze basse.

Da notare che per impedenze di carico uguali, la perdita di tensione che si mani-

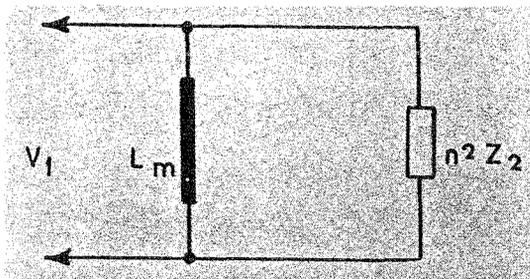


Fig. 5 - Circuito caratteristico di un trasformatore.

festi con il variare della frequenza sono tanto minori quanto minore è l'impedenza interna del generatore.

Le perdite di tensioni che si manifestano nella gamma delle frequenze basse dipendono essenzialmente dalla induttanza di magnetizzazione L_m la quale dovrà avere un valore molto elevato allo scopo di mantenere le perdite stesse nei minimi limiti possibili. Ciò significa che il primario del trasformatore dovrà essere composto da un notevole numero di spire.

L'induttanza di magnetizzazione L_m , che dipende evidentemente dalla permeabilità magnetica del nucleo, cioè dalla induzione magnetica, e di conseguenza dalla tensione applicata, pertanto la induttanza L_m , in genere diminuisce con il diminuire del livello della tensione applicata. Ciò significa che **quanto è minore il livello della tensione applicata maggiori sono le perdite della tensione secondaria, passando dalla gamma di frequenze medie a quella delle frequenze basse.**

La prova della risposta alle frequenze basse di un trasformatore dovrà perciò essere effettuata con il trasformatore stesso caricato alla sua impedenza di carico e alimentato mediante un generatore che abbia una impedenza interna

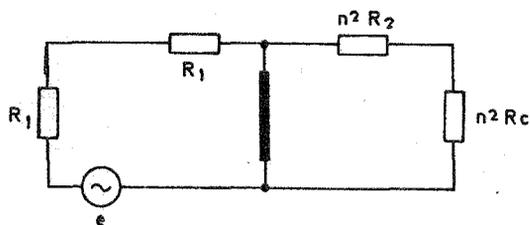


Fig. 6 - Equivalente di un circuito di trasformatore soggetto a delle frequenze basse.

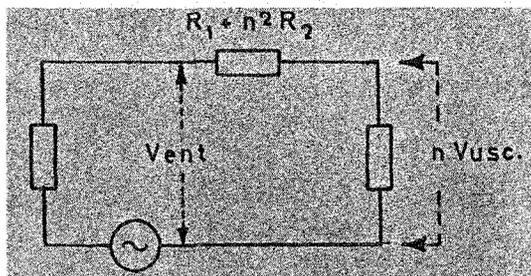


Fig. 7 - Equivalente del circuito di un trasformatore funzionante sulle frequenze medie.

uguale all'impedenza di carico riportata al primario.

Questa prova viene definita « a forza elettromotrice costante ». Durante la prova il livello della tensione di alimentazione dovrà essere il più basso al quale il trasformatore dovrà lavorare.

Frequenze medie

La gamma delle frequenze medie, è quella in cui un trasformatore dà la migliore risposta.

Infatti alle frequenze medie l'induttanza di magnetizzazione L_m ha una reattanza così elevata che la corrente di magnetizzazione è praticamente trascurabile rispetto a quella assorbita dal carico. Pertanto il circuito illustrato in figura 5 si trasforma in quello di figura 7 nel quale si è tenuto conto anche delle perdite.

In un circuito del genere la sola perdita di tensione, a parte il rapporto di trasformazione, è dovuta alla caduta di tensione provocata dalla resistenza ohmica degli avvolgimenti.

Siccome questa caduta è indipendente dalla frequenza, essa non ha alcuna influenza sulla risposta delle frequenze medie (tale caduta in effetti ha una note-

vole importanza sulle perdite effettive del trasformatore su tutta la gamma delle frequenze).

Frequenze alte

Quando la frequenza in un trasformatore aumenta la corrente magnetizzante assume un valore del tutto trascurabile e quindi l'induttanza di magnetizzazione L_m può essere eliminata dal circuito equivalente. Inoltre la porzione del flusso magnetico, che è prodotto dall'avvolgimento primario, che non è concatenata con il secondario (che malgrado l'accoppiamento fra i due avvolgimenti sia il più stretto possibile non è mai nulla) non costituisce utilità alcuna per il trasformatore ed è perciò rappresentata come una induttanza di dispersione L_d' , messa in serie al circuito; essa alle frequenze alte presenta una reattanza di notevole valore.

Anche la parte di flusso che è prodotto dalla corrente secondaria e che non si concatena con il circuito primario rappresenta una induttanza di dispersione in serie, e nello schema è indicata con la lettera L_d'' .

Le capacità che si formano tra spira e spira e tra gli strati dell'avvolgimento provocano a loro volta delle correnti di natura capacitiva che diventano piuttosto sensibili alle frequenze alte.

Nello schema le suddette capacità distribuite negli avvolgimenti sono rappresentate dalle due capacità C_s e C_{ss} messe in derivazione ai due avvolgimenti.

Il circuito che equivale ad un trasformatore relativo alle frequenze alte è rappresentato in figura 8.

Se, considerando il comportamento del trasformatore a vuoto, supponiamo che l'impedenza interna del generatore R_g sia uguale a zero si avrà una frequenza alla

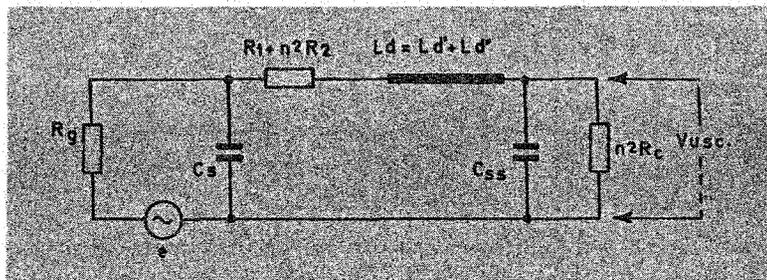


Fig. 8 - Equivalente del circuito di un trasformatore funzionante nella gamma delle frequenze alte.

quale si verificheranno le condizioni di risonanza in serie fra l'induttanza di dispersione e la capacità secondaria. A questa frequenza di risonanza la tensione secondaria sarà « n » volte la tensione primaria (ciò indipendentemente dal rapporto di trasformazione). « n » in questo caso rappresenta il coefficiente di risonanza che oltre a dipendere dalle resistenze ohmiche è legato anche alle perdite magnetiche.

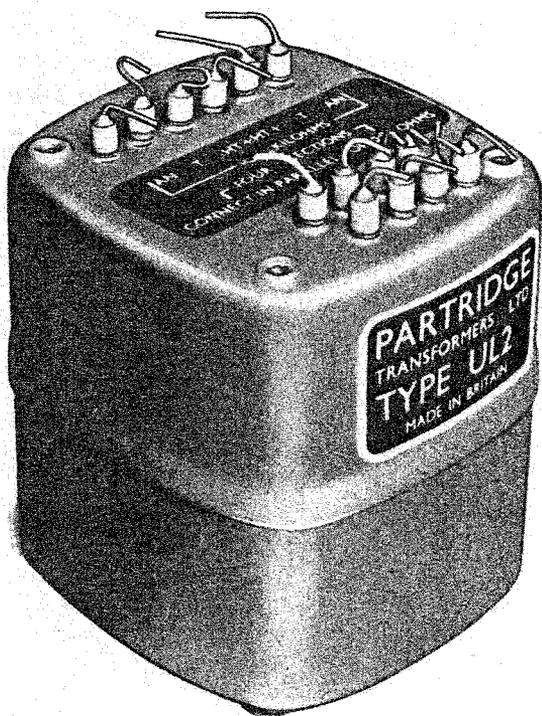


Fig. 9 - Trasformatore HI-FI Partridge per circuiti ultralinee; potenza 50. W, risposta 30 ÷ 30.000 Hz ± 0,5 dB.

Quindi, partendo dalla gamma delle frequenze medie, se si aumenta la frequenza, la tensione secondaria inizierà a crescere fino a raggiungere un picco netto che si manifesta alla frequenza di risonanza dopo di che ritornerà a decrescere, fino ad annullarsi.

Se l'impedenza interna del generatore R_g non è attorno allo zero ma ha un certo valore, avvicinandosi alle condizioni di risonanza l'impedenza del circuito risonante diminuirà riducendosi rapidamente alla sola resistenza ohmica di modo che

la corrente assorbita aumenta e di conseguenza cresce anche la caduta della impedenza interna R_g .

In queste condizioni la tensione applicata al trasformatore risulta assai minore e pertanto, pur essendo la tensione secondaria « n » volte maggiore la tensione primaria, verso la risonanza risulterà notevolmente attenuata e non presenterà il picco netto che si verifica nella alimentazione a tensione costante, mantenendosi maggiormente costante al variare della frequenza.

Caricando il secondario con una resistenza di valore piuttosto alto si avrà un certo smorzamento del circuito, « n » risulterà minore ed il picco di risonanza meno marcato; diminuendo la resistenza di carico, « n » si abbasserà ulteriormente fino alla scomparsa di qualsiasi effetto di risonanza. Ciò si otterrà quando la reattanza di C_s è maggiore rispetto al carico R_c di modo che si può trascurare C_s , e la tensione secondaria sarà determinata dal partitore $L_d \div R_c$.

Con l'aumentare della frequenza aumenterà la tensione agli estremi di L_d , a scapito di quella che si ha agli estremi di R_c , cioè della tensione utile.

L'influenza di R_g , con un valore di R_c piuttosto basso, permette di osservare che con l'aumentare della frequenza aumenta l'impedenza di L_d e quindi diminuisce la corrente. Ciò produce una diminuzione della caduta di tensione in R_g ed un aumento della tensione applicata al trasformatore e pertanto la tensione secondaria subirà una perdita tanto minore quanto maggiore è R_g .

Si può dunque affermare che maggiore è l'impedenza interna del generatore che alimenta un trasformatore, migliore è la risposta di frequenza alle frequenze alte (ciò in pratica è esattamente il contrario di quanto avviene per le frequenze basse).

Inoltre con una resistenza di carico di valore alto si ottiene un aumento di tensione alle frequenze elevate finché si ottiene un picco alla frequenza di risonanza (che in genere rimane più elevata della massima frequenza acustica). Con valori bassi di resistenza di carico si ha invece una rapida caduta di tensione alle frequenze elevate a causa dell'induttanza di dispersione.

Esiste perciò un valore della resistenza di carico che consente di raggiungere un compromesso fra i due casi suddetti e per il quale la risposta è la più lineare possibile: si tratta del valore sul quale dovrà essere caricato il trasformatore.

Ciò ci permette di affermare che in un trasformatore di bassa frequenza non è sufficiente preoccuparsi di segnalare il rapporto di alimentazione, come si fa ad esempio per i trasformatori di alimentazione, ma si deve dichiarare con esattezza il carico sul quale esso dovrà lavorare.

In pratica viene specificato il carico normale di lavoro ed il carico del primario quando il secondario è sottoposto al carico suddetto.

Se ad esempio diciamo che un trasformatore ha le caratteristiche di 25.000-500 Ω , ciò significa che il carico normale che deve essere applicato al secondario allo scopo di ottenere la migliore risposta è di 500 Ω e che una volta che il trasformatore è collegato a questo carico dal primario viene visto un carico di 25.000 Ω . Se il secondario venisse caricato su 250 Ω , l'impedenza vista dal primario risulterebbe di 12.500 Ω e si avrebbe una notevole perdita di tensione alle frequenze alte.

Possiamo pertanto concludere queste brevi note affermando che un trasformatore che non sia caricato è soggetto ad una distorsione molto elevata e che la sua tensione cade rapidamente alle frequenze basse ed aumenta eccessivamente alle frequenze alte. Un trasformatore la cui resistenza di carico sia troppo elevata (cioè un trasformatore eccessivamente caricato) subisce una notevole perdita alle frequenze alte anche se in queste condizioni migliorano tanto le distorsioni quanto la risposta alle frequenze basse.

Inoltre un trasformatore se viene lasciato a circuito aperto, o comunque poco caricato, quando è eccitato in modo brusco dà luogo a delle oscillazioni, alle frequenze di risonanza delle induttanze di dispersione con la capacità degli avvolgimenti, provocando delle notevoli alterazioni dei segnali acustici. La resistenza di carico normale infatti deve essere tale da smorzare nel modo più assoluto le oscillazioni di questo genere.

Per quanto concerne la resistenza interna del generatore equivalente si nota che un trasformatore alimentato da un generatore con elevata impedenza interna oltre a distorcere, ha una pessima risposta alle frequenze basse e di conseguenza non è da usare anche se la risposta alle frequenze alte è buona.

Un'alimentazione a tensione costante, per lo meno il più possibile, consente invece di ottenere una buona risposta anche alle frequenze più alte.

Un trasformatore subisce delle distorsioni che sono differenti ai vari livelli. In genere la caratteristica di magnetizzazione, che è dovuta al numero delle spire, viene adattata al livello al quale il trasformatore dovrà essere normalmente sottoposto. Si possono perciò avere dei trasformatori, come ad esempio quelli di entrata, che sono adatti a lavorare a livelli deboli ed altri trasformatori, come quelli di uscita, adatti a lavorare con livelli alti.

Un ultimo avvertimento deve essere necessariamente dato sul modo di misurare la distorsione la quale dovrà essere controllata mediante un generatore del tipo a bassa distorsione, con impedenza di uscita identica a quella normale di lavoro del primario. Il trasformatore dovrà essere caricato al secondario per il valore nominale del carico, e si prenderà in considerazione la frequenza più bassa prevista dalle caratteristiche del trasformatore stesso (20,25 o 30 Hz). Il livello sarà scelto in modo da corrispondere a quello normale di lavoro: se il trasformatore dovrà lavorare su differenti livelli le prove saranno effettuate su ciascuno di essi.

La risposta alle frequenze elevate si eseguirà a tensione costante, cioè mantenendo costante la tensione del generatore che è applicata al primario. Il secondario dovrà essere caricato sul normale carico di lavoro, tenendo presente che non ha alcuna importanza il livello al quale il controllo viene effettuato.

Per controllare che non si abbiano delle oscillazioni parassite si può applicare al primario una tensione a 1.000 Hz avente forma rettangolare con un livello molto elevato e controllando la forma d'onda all'oscillografo quando il secondario è normalmente caricato.