

Un circuito "step-start"

per la limitazione della corrente all'inserzione e la precarica del circuito di anodica degli amplificatori lineari a valvole

1ª parte

Introduzione

Quasi tutti i radioamatori posseggono qualche apparecchiatura dotata di alimentatore con un trasformatore da rete - 230Vac 50Hz - con potenza nominale elevata.

Tali trasformatori, nella maggioranza dei casi, alimentano al secondario dei circuiti raddrizzatori (convertitore AC/DC) con condensatori di filtro di elevato valore capacitivo.

Il più delle apparecchiature di cui sopra sono generalmente amplificatori lineari a valvole, dove il trasformatore di potenza più grande è quello che alimenta il raddrizzatore e il susseguente filtro capacitivo del circuito di alimentazione anodica.

Applicando la tensione di rete senza alcuna limitazione circuitale al trasformatore di tali apparecchiature, si manifesta sempre un transitorio della durata di un certo numero di periodi di rete (per una rete elettrica di alimentazione a 50Hz, il periodo di rete è 20ms, 0.02 secondi) con elevati valori della corrente assorbita, in grado di far intervenire anche l'interruttore magnetotermico generale d'impianto all'accensione, anche a vuoto.

Inoltre, durante il transitorio di carica del filtro capacitivo di uscita, in base al valore di induttanza equivalente del trasforma-

to, si possono generare delle sovratensioni temporanee sulla tensione raddrizzata in uscita, con possibili danni alle valvole, provocando l'innesco di un arco e la seguente scarica distruttiva nella valvola o in qualche componente del circuito di anodica.

Il circuito qui proposto, nato dopo aver bruciato alcune volte le valvole - e non solo - all'accensione dell'amplificatore lineare, si propone di risolvere tale problema, nel modo più economico, semplice ed affidabile possibile.

Il problema di una elevata corrente di inserzione è ben noto ai possessori di alcune serie di am-

plificatori lineari commerciali (un esempio per tutti i TL-922, di prima generazione) e si pone per molti amplificatori commerciali attualmente in vendita, di gamma economica, e di vari costruttori, che per rendere appetibile il prezzo hanno sacrificato più di qualcosa negli accorgimenti circuitali; la riprova di ciò è il fatto che gli stessi costruttori offrono tale circuito come accessorio esterno, oppure lo integrano direttamente negli amplificatori di costo superiore...

Ovviamente se il vostro amplificatore lineare a valvole commerciale o autocostruito è già realizzato nel miglior modo possi-

Fig. 1 - Amplificatore lineare a valvole



bile – il mio non lo era– e dispone già di un tale dispositivo, potete anche saltare a piè pari l'articolo...!

La corrente di prima magnetizzazione di un trasformatore

Qualunque trasformatore costruito su nucleo ferromagnetico presenta il fenomeno transitorio della corrente di prima magnetizzazione, che comporta all'applicazione della tensione di rete al primario, l'assorbimento di una elevata corrente, tipicamente tra le 10 e le 25 volte la corrente nominale, per diversi periodi di rete.

L'esatta entità della corrente di prima magnetizzazione assorbita dipende da vari fattori:

- dal valore istantaneo della tensione di rete al momento dell'applicazione al trasformatore; il caso peggiore é se si applica la rete al suo passaggio per lo zero.
- dal valore della resistenza dell'avvolgimento primario
- dal valore dell'impedenza della rete di alimentazione
- dal numero di spire e dalle caratteristiche costruttive del trasformatore stesso; i trasformatori toroidali hanno i valori in assoluto più elevati.

Dopo circa 8...10 periodi di rete ($10 \times 20\text{ms} = 0,2$ secondi) il transitorio si può considerare esaurito e la corrente assorbita dipende quindi dal carico applicato al secondario del trasformatore, quindi se il trasformatore è usato entro i suoi dati nominali, assorbe al primario la sua corrente nominale.

Per dare un'idea, per un classico trasformatore (elevatore) per alimentazione anodica da 2kVA di potenza nominale, non toroidale, il valore tipico massimo é di circa 10...18 volte la corrente nominale; con una corrente nominale di 8,7 A al primario, la corrente di prima magnetizzazione può raggiungere tranquillamente i 100 A di picco.

Vi riporto alcune registrazioni

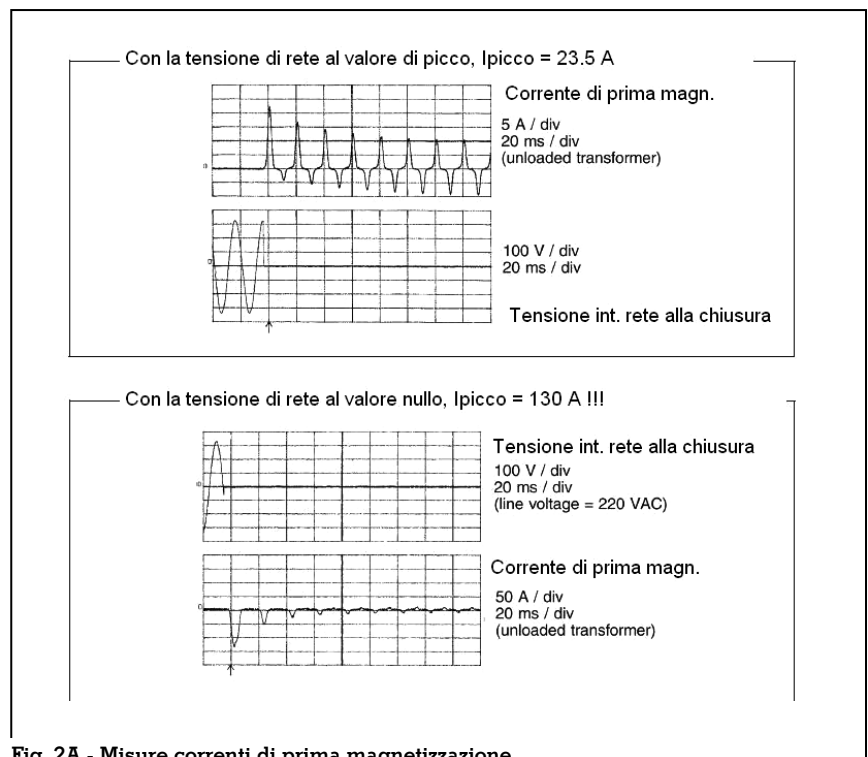
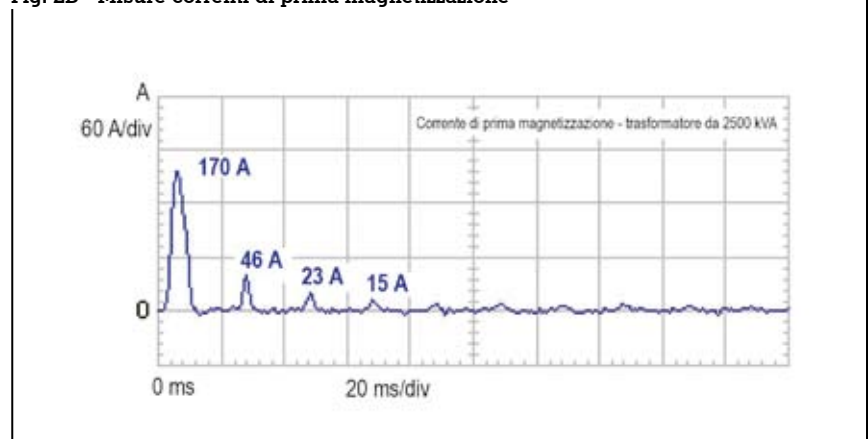


Fig. 2A - Misure correnti di prima magnetizzazione

Fig. 2B - Misure correnti di prima magnetizzazione



di correnti di prima magnetizzazione.

Tale fenomeno si può spiegare mediante l'analisi di un tipico ciclo di isteresi per il lamierino ferromagnetico usato per i trasformatori.

Il ciclo di isteresi rende conto della relazione non lineare esistente fra l'induzione magnetica B generata nel lamierino del nucleo ferromagnetico del trasformatore, in ragione dell'intensità del campo magnetico H, proporzionale alla corrente circolante nell'avvolgimento stesso.

Supponendo di partire con un nucleo smagnetizzato, all'accen-

sione, in base al valore istantaneo della tensione di rete e all'area della tensione applicata nella semionda (positiva o negativa) viene raggiunto un certo valore di induzione (positiva o negativa, in base al segno della tensione applicata) e conseguentemente di corrente assorbita, che è proporzionale al valore di H, corrispondente al valore di B raggiunto sul diagramma di isteresi, come ben visibile nelle figure seguenti.

Se vengono quindi raggiunti valori elevati di B tali da portare il nucleo in saturazione, il valore di corrente assorbita corrispon-

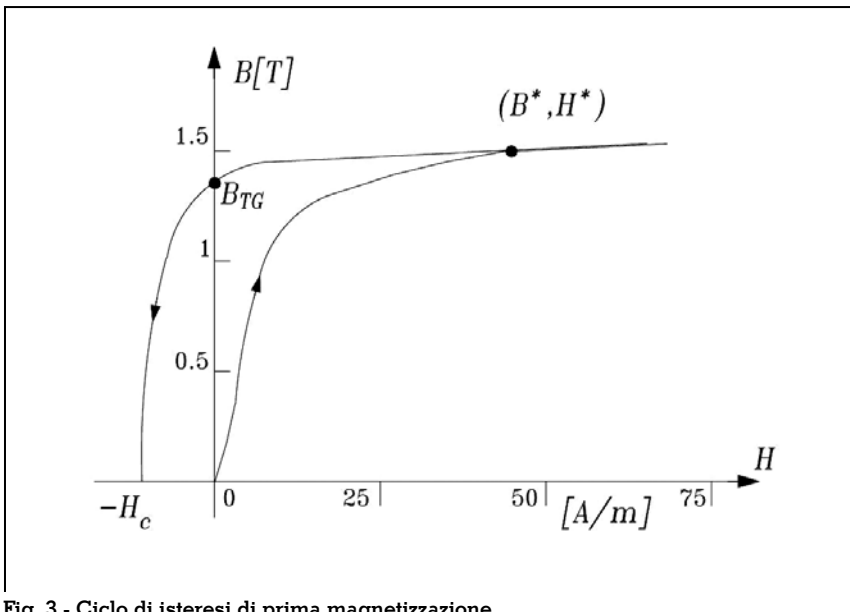
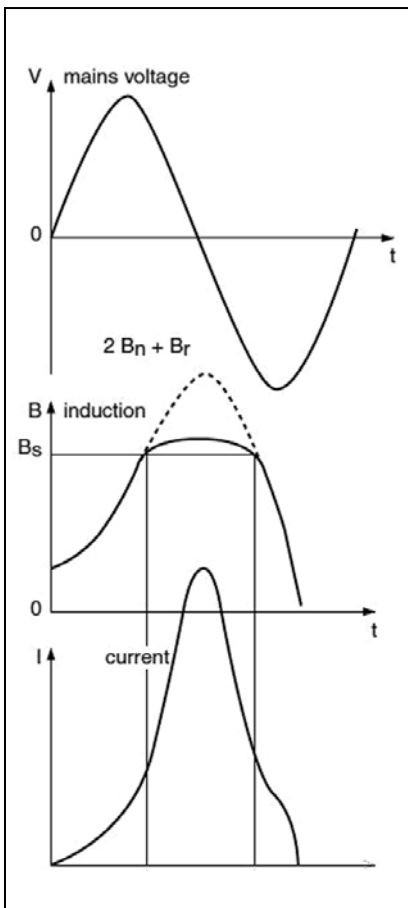


Fig. 3 - Ciclo di isteresi di prima magnetizzazione

dente alla H è molto elevato e di fatto il trasformatore si comporta nei primi istanti quasi come un cortocircuito; la corrente è limitata dall'impedenza della rete e

Fig. 4 - Grafici forme d'onda tensione di rete, induzione e corrente



dalla resistenza in serie dell'avvolgimento primario stesso.

Se ora si considera che il materiale ferromagnetico del nucleo è sottoposto a magnetizzazione alternata, in base all'andamento della tensione di rete applicata che si suppone sinusoidale, dopo un certo numero di magnetizzazioni di assestamento, ossia di periodi di rete, il funzionamento si stabilizza lungo un ciclo, detto ciclo di isteresi, a re-

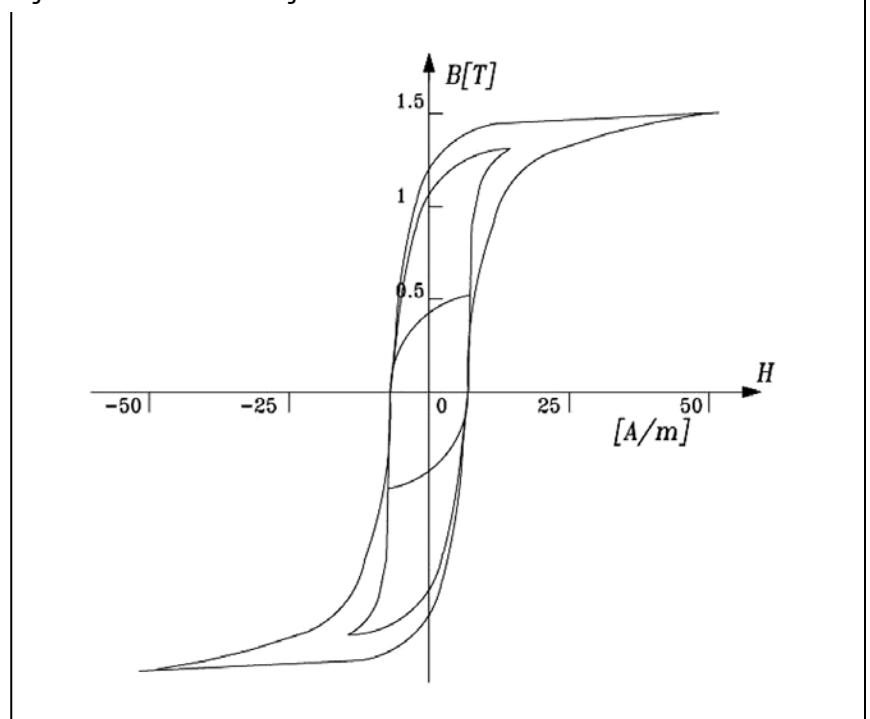
gime, e la corrente assorbita assume il caratteristico valore della corrente a vuoto del trasformatore, se appunto il trasformatore non è caricato sul secondario.

La corrente di prima carica (pre-carica) in un raddrizzatore con capacità in uscita

Come già anticipato, oltre al fenomeno della corrente di prima magnetizzazione del trasformatore, ipotizzato terminato circa dopo 200 ms (0,2 secondi) dall'accensione, occorre poi tenere conto del comportamento del circuito raddrizzatore sul secondario.

Nella figura seguente si può osservare un circuito tipico di alimentatore per tensione anodica per un amplificatore lineare; comunque, a parte i valori di tensione in uscita e i diversi componenti usati, è del tutto simile alla parte non regolata di un normale alimentatore lineare serie, ad esempio per un classico alimentatore lineare da 13,8V in continua, per grosse correnti, e anche il comportamento lato rete che ne deriva è simile.

Fig. 5 - Curve d'isteresi a regime



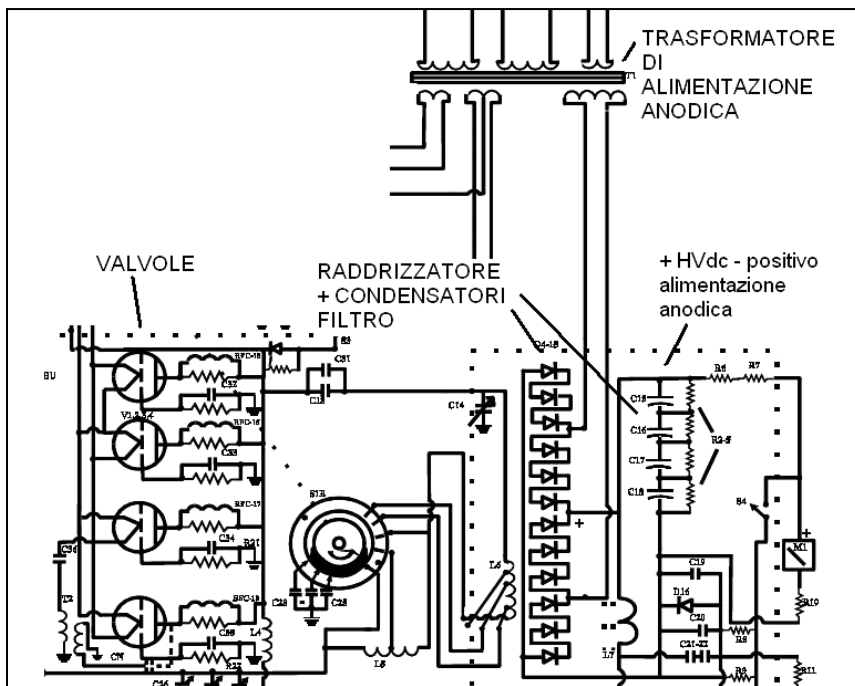


Fig. 6 - Schema alimentazione amplificatore lineare

Nello schema in oggetto, il trasformatore di alimentazione anodica con il relativo raddrizzatore a ponte (i diodi del ponte sono tre in serie per ramo) e il filtro capacitivo, costituito da 4 condensatori in serie per un valore equivalente di $62,5\mu\text{F}$ (C_{eq_filtro}), ha in uscita una tensione in continua a vuoto di 1700Vdc e a carico intorno a 1500Vdc ; il trasformatore ha l'ingresso multitemperatura, ma consideriamo che abbia $V_{in} = 230\text{Vac}$ e tensione al secondario, a vuoto (nominale) di circa 1310Vac .

All'accensione i condensatori di uscita sono scarichi e di fatto si presentano come un cortocircuito all'uscita del ponte raddrizzatore, e la corrente di carica di tali condensatori è limitata solo dall'impedenza della rete e dall'impedenza del trasformatore, e da tali valori dipende appunto il valore di picco della corrente di carica.

Conoscendo in dettaglio tutti i parametri della rete di alimentazione (impedenza di cortocircuito) e il circuito equivalente completo del trasformatore, si può giungere ad uno schema equivalente, al secondario del trasformatore di tipo $R - L - C_{eq_filtro}$, dove poi occorre considerare la

presenza del ponte raddrizzatore a diodi e il carico connesso ai capi del condensatore di filtro stesso.

Pur essendo un circuito non lineare per la presenza del ponte a diodi - trascurando la eventuale saturazione del trasformatore - e con la presenza di elementi $R - L - C_{eq_filtro} - R_{carico}$, è possibile ricavare una soluzione analitica per valutare quanto sia la massima corrente di picco lato secondario e quindi l'andamento della tensione anodica continua durante il transitorio dell'accensione.

Non vi riporto la formula per

motivi di semplicità di trattazione: è la soluzione di un'equazione differenziale del secondo ordine; comunque per il calcolo del primo picco di corrente il valore trovato torna abbastanza con le simulazioni. Di fatto si ha un'oscillazione risonante dovuta alla frequenza di risonanza data da L e C_{eq} , con una componente di smorzamento esponenziale e un termine sinusoidale a tale frequenza, che dura solo per la prima semionda positiva di tale oscillazione, per la presenza dei diodi che permettono solo correnti positive; al termine della quale si completa la carica dei condensatori di filtro. Comunque si vede bene il fenomeno dalle figure delle simulazioni allegate.

Ho deciso quindi di effettuare una simulazione circuitale, ricavando il circuito equivalente semplificato del trasformatore del lineare, spinto dalla curiosità di vedere se ottenevo qualcosa di simile alla realtà, per riuscire ad avere un'idea delle correnti in gioco senza alcun dispositivo di limitazione, e non ultimo per avere conferma di quanto calcolato con l'equazione differenziale...

In base ai dati del trasformatore (noti o stimati), ottenibili dal costruttore, o ricavabili dalla targa dello stesso, indicati nella tabella 1, si possono ricavare con delle semplici relazioni, la $R_{e''}$ e la $L_{e''}$ equivalenti in serie sul secondario di un trasformatore ideale con il rapporto di trasforma-

Tab. 1

Dati di ingresso	Valore	Note
Potenza nominale	2kVA	
Tensione nominale al primario	230 V	ac, rms
Frequenza nominale di rete	50 Hz	
Tensione nominale al secondario	1310 V	ac, rms, a vuoto
Rapporto di trasformazione nom.	5.7	
Corrente nominale al primario	8.7 A	ac, rms
Corrente nominale al secondario	1.52 A	ac, rms
Tensione di cortocircuito	3.50 %	
Potenza di cortocircuito	2.80 %	
$\cos \varphi$ di cortocircuito	0.80	in alternativa alla pot.di c.c.
Valori calcolati del circuito equivalente		
$L_{e''}$	60 mH	$X_{e''} = 18.7 \text{ ohm}$
$R_{e''}$	25 Ω	

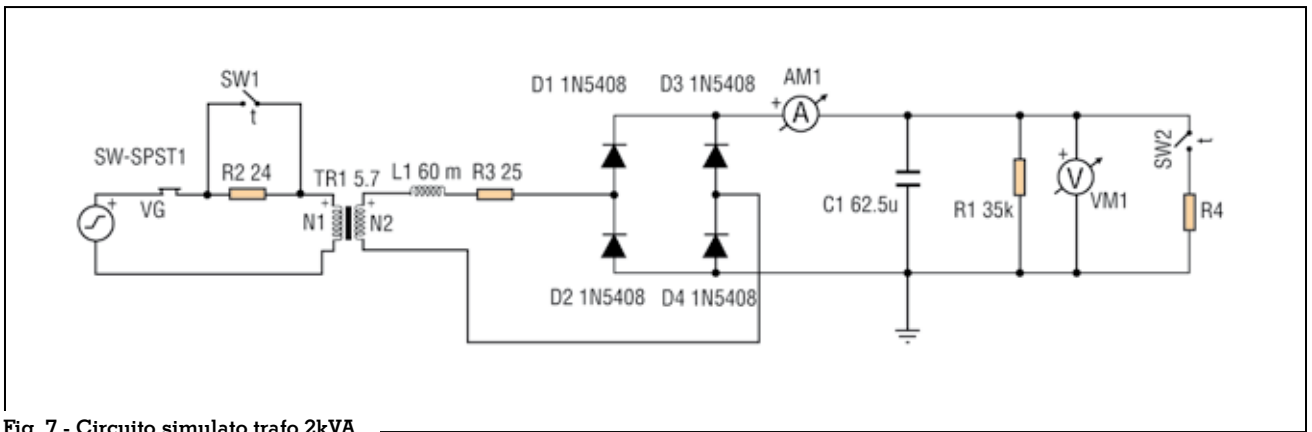


Fig. 7 - Circuito simulato trafo 2kVA

zione indicato, da inserire nel circuito per la simulazione.

Le simulazioni sono state effettuate con l'ottimo, semplice, intuitivo e gratuito software della Texas Instruments, il TINA, si veda il link e i suggerimenti in bibliografia in caso volestes scaricarlo

e cimentarvi...

I risultati della simulazione danno un'idea di cosa accade nel transitorio; i reali andamenti sui componenti reali sono qualitativamente simili, anche se quantitativamente possono differire, in base alle semplificazioni della si-

mulazione e all'accuratezza dei parametri del modello.

Comunque i valori misurabili in realtà forniscono dei valori inferiori, poichè si è trascurata l'impedenza della rete di alimentazione e quella dei cavi di alimentazione, e si è usato per il trasformatore un modello semplificato, lineare.

Comunque dai valori che si possono vedere dai grafici delle simulazioni, senza resistenza di limitazione, potete bene immaginare che i diodi del ponte, il trasformatore e i condensatori siano sottoposti ad un picco con elevata corrente di carica, sebbene di piccola durata, circa 30 A per meno di 10ms, quando in teoria la massima corrente di uscita è inferiore ad un 1 A (700mA). I diodi usati sul mio lineare reggono fino a 40 A di picco, quindi nessun problema in teoria.

Tale corrente sollecita tutto l'insieme, condensatori di uscita inclusi, e sicuramente non è salutare per la vita e durata operativa dei componenti stessi.

Inoltre anche l'applicazione della tensione anodica alle valvole dell'amplificatore lineare, all'accensione, in modo così brusco, da 0 a 2kV in meno di 8...10ms, (250V / ms), non giova certo alla salute delle stesse. Come vi dicevo ho avuto brutte esperienze; tra l'altro le valvole in del mio lineare hanno 1650 Vac come massima tensione applicabile di anodica...e di norma è meglio non andare oltre il 5% di tale valore.

La simulazione rispecchia in modo fedele quanto accade sul

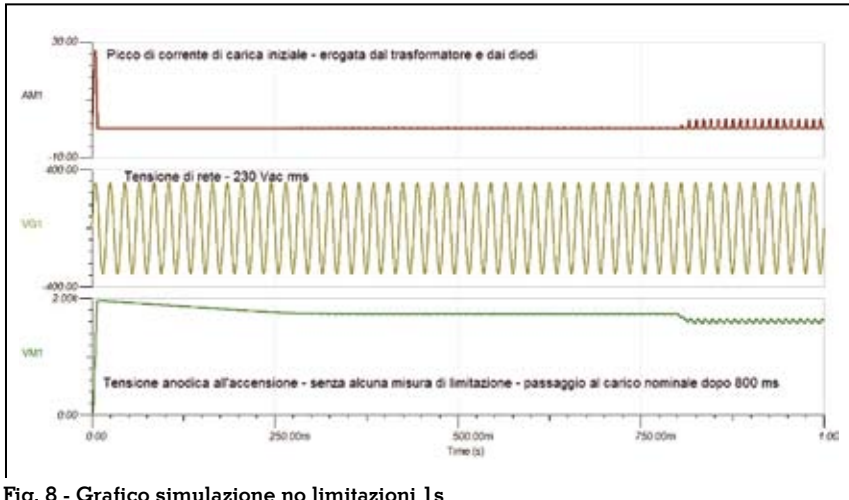
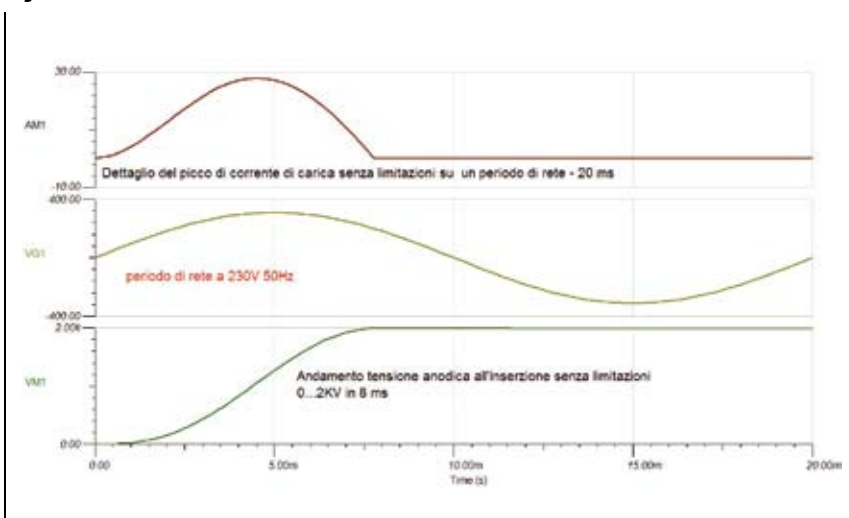


Fig. 8 - Grafico simulazione no limitazioni 1s

Fig. 9A - Grafico simulazione no limitazioni 20ms



circuito di anodica: si ha una sovraelongazione rilevabile dal voltmetro che raggiunge circa i 1800...1950Vdc di picco; non me la sono sentita di misurare con un divisore di tensione e l'oscilloscopio digitale un'alimentazione così pericolosa al fine di farvi confrontare il segnale misurato con le simulazioni, non me ne vogliate per l'eccesso di prudenza, che in questi casi non è mai troppa!

Sistemi di limitazione della corrente all'inserzione

La soluzione circuitale per risolvere entrambi i problemi è quella di inserire una resistenza di potenza di limitazione della corrente, in serie al primario.

In tal modo si limita la corrente di prima magnetizzazione, la corrente di carica dei condensatori e il tempo di salita e la sovraelongazione della tensione anodica, effettuando una "carica" graduale, solitamente denominata "precarica"; ovviamente serve cortocircuitare poi la resistenza a transitorio esaurito, circa dopo uno o più secondi, prima di usare il lineare...

Questo circuito, comunemente usato dalla maggioranza dei costruttori di amplificatori, in letteratura si chiama "step-start", in italiano si potrebbe tradurre come "ad avviamento graduale".

Vediamo come si può ricavare qualche semplice criterio di dimensionamento per la resistenza da porre in serie.

Come già accennato, a riguardo della corrente di prima magnetizzazione assorbita, il trasformatore appare quasi come un cortocircuito all'inserzione, per la rete di alimentazione.

Poichè è nota la tensione di rete applicata e il relativo valore di picco, $V_p_{rete} = 230\text{ V} \times 1.414 = 325\text{ V}$, per effettuare una prima valutazione consideriamo il trasformatore proprio come un cortocircuito e che la rete assuma il suo valore massimo.

Quindi non volendo far saltare l'interruttore magnetotermico di un normale impianto domestico,

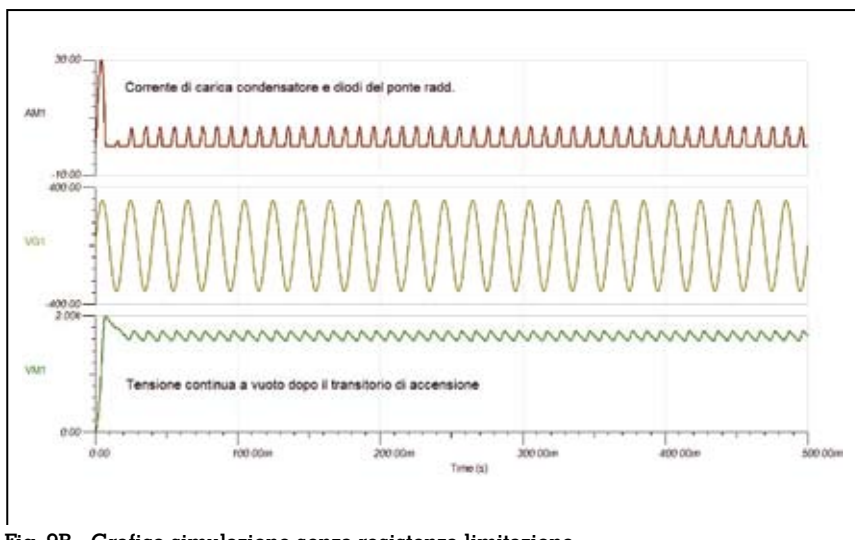
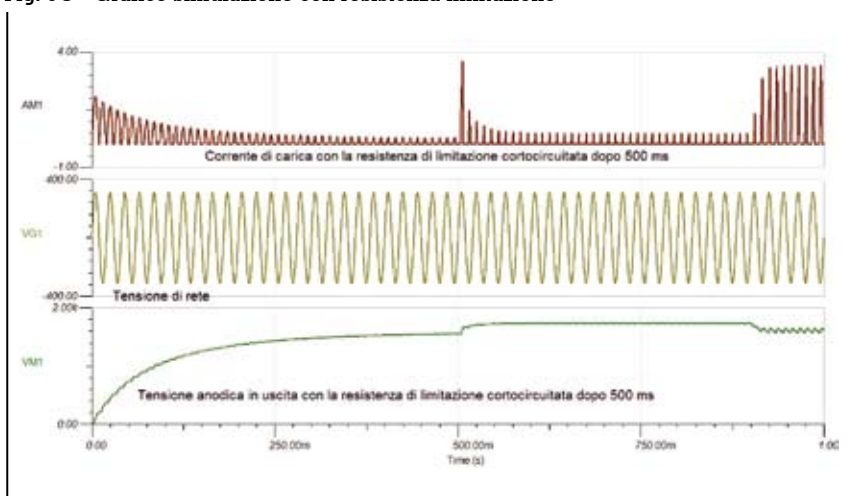


Fig. 9B - Grafico simulazione senza resistenza limitazione

Fig. 9C - Grafico simulazione con resistenza limitazione



una limitazione ovvia è di tenersi al di sotto dei 16 A di picco.

Dunque si ha: $R_{limitazione} = 325\text{ V} / 16\text{ A} \geq 20,3\ \Omega$. Avendo nel cassetto delle resistenze da $12\ \Omega$ 15 W, ho ben pensato di usarne due in serie.

La potenza dissipata, come se alla resistenza limitatrice fosse applicata interamente la tensione di rete, continuativamente, appare molto elevata: $P = 230\text{ V}^2 / 24\ \Omega = 2204\text{ W}$; dobbiamo tuttavia considerare che dura per pochi periodi di rete ad un valore effettivamente elevato, quindi ipotizziamo 40...60 ms, poi torna su valori accettabili, e rimane tale anche durante la fase di carica dei condensatori di uscita; tale fase non dura più di uno...due secondi, in tutto, comunque.

La resistenza quindi "riposa"

per tutto il tempo necessario a raffreddarsi, mentre voi usate il lineare...quindi se la resistenza sopravvive ai primi istanti, poi ha tempo di raffreddarsi.

I grafici delle simulazioni mostrati nelle due figure seguenti evidenziano gli andamenti della corrente di carica e della tensione anodica con e senza la resistenza limitatrice da $24\ \Omega$ inserita al primario, e l'effetto è quello voluto, ossia di limitare la corrente di carica (da 30 A senza a 4 A con la resistenza) a valori più contenuti e far raggiungere il valore di regime alla tensione anodica in uscita in modo più graduale, e soprattutto senza sovra-tensioni.

Gli andamenti delle simulazioni rispecchiano molto bene cosa accade in pratica con le resisten-

za inserita: la tensione anodica all'inserzione sale gradualmente fino a 1400V in continua in meno di un secondo, e alla chiusura del relè sale a gradino fino alla tensione nominale di 1600V, il tutto in modo molto meno stressante per i componenti dell'alimentatore del lineare, come ben evidenziato dai valori di corrente molto inferiori.

Ritornando sul dimensionamento della resistenza limitatrice, in tali dispositivi di potenza, dove si ha un picco molto rapido di generazione di calore, si determina una sovratemperatura molto rapida che non ha il tempo di diffondersi istantaneamente nel contenitore e, successivamente nel dissipatore. Si può considerarla simile ad una trasformazione "adiabatica" = senza cessione di calore" che coinvolge solo il conduttore interno del resistore.

Nella normale pratica di progettazione industriale, nota l'impedenza termica del resistore, si può verificare sui diagrammi forniti dal costruttore per il componente se la durata e l'energia dissipata durante il picco rientrano nelle specifiche dello stesso e quindi che non danneggino il componente.

Purtroppo sui datasheet delle comuni resistenze di potenza fino a 100W dei vari costruttori non si trovano tali indicazioni, quindi occorre procedere in una maniera più empirica e sperimentale.

La massima potenza di picco tollerabile dai resistori dipende poi molto dall'involucro e dai materiali usati nella costruzione, di solito comunque come regola generale vale dalle 10 alle 20 volte il valore di potenza nominale.

Dalle prime prove le resistenze si scaldavano appena, comunque il dubbio che potessero essere piccole era rimasto, quindi ho cercato di vedere cosa utilizzano per lo stesso scopo i costruttori professionali di amplificatori lineari, e con mia sorpresa ho trovato che per lo stesso circuito, e per trasformatori anche molto più grandi, **tutti i costruttori usano alla fine resistenze che vanno**

dai 10 ai 50 Ω , con valori di potenza dai 20 ai 50 W.

Una ulteriore riprova di quanto sopra, ossia che alla fine non servono delle resistenze enormi, vedi anche lo schema del circuito realizzato più avanti, è il fatto che sia sufficiente proteggere le resistenze con un fusibile ritardato da 2 A - 250Vac; difatti tale fusibile, limita "termicamente" la potenza dissipabile sulla resistenza.

Si veda il grafico della caratteristica di intervento allegata, di una serie standard 5 x 20mm con caratteristica ritardata, come quella usata nel circuito, da cui si vede che evita con l'eventuale intervento a 40 A in 10ms di raggiungere valori pericolosi per le resistenze e il relativo cablaggio. Inoltre se per qualche ragione il relè non si attiva dopo il tempo prefissato, e si prova ad attivare il lineare, si provoca solo l'intervento del fusibile da 2 A, senza ulteriori problemi.

Verificati gli andamenti simulati e poi quelli reali, ho ritenuto soddisfacenti i valori scelti per le resistenze di limitazione.

Il valore della resistenza di limitazione non è critico, verificate comunque in base alla corrente massima risultante, con l'ausilio del grafico di cui sopra, se il fusibile da 2 A possa ancora andare bene o meno.

Se il dubbio sulla potenza da usare comunque vi rimane, se siete animati da sano spirito di sperimentazione e avete qualche resistore da sacrificare, **ma mi raccomando usando tutte le cautele necessarie ad evitare folgoramenti letali o scottature**, basta predisporre un semplice circuito di prova, con un interruttore magnetotermico da 4...6 A e provare a collegare direttamente alla rete a 230Vac le vostre resistenze per un secondo o meno; con una manovra veloce "chiudi e apri" dell'interruttore potrete valutare il grado di riscaldamento raggiunto, in una condizione che difficilmente sarà poi raggiunta nel circuito reale; se le resistenze non si alterano come valore e non si sono troppo cotte nella manovra, sono adatte al nostro circuito sicuramente...

(Continua)

Fig. 10 - Caratteristiche intervento fusibili 5x20mm ritardati

