

Capitolo 3

Il Flicker Luminoso

3.1 Effetto delle interarmoniche e subarmoniche sovrapposte alla tensione di alimentazione: il

Flicker luminoso

La distorsione della tensione di rete ha caratterizzato in questi ultimi anni in maniera sempre maggiore lo studio dei problemi connessi alla qualità dell'energia elettrica fornita alle utenze dalla società distributrice a causa della crescente presenza di carichi non lineari collegati alle linee di alimentazione in media e bassa tensione.

Se alla tensione di rete sono sovrapposte interarmoniche o subarmoniche, si può originare un particolare tipo di fenomeno luminoso, associato alla luce emessa dalle comuni lampade, percepito dall'occhio umano e noto come 'Flicker'. Esso è definito come instabilità della percezione visiva indotta da uno stimolo luminoso la cui luminanza o la cui distribuzione spettrale fluttuano nel tempo [1].

Per meglio capire tale fenomeno si deve prima osservare che l'occhio è in grado di rilevare le oscillazioni della luce se queste hanno frequenza non superiore a 30Hz. Il flicker luminoso è rappresentato da uno sfarfallio della luce emessa da una lampada, cioè da una oscillazione del flusso luminoso nel campo di frequenze rilevabili dall'occhio umano, cioè tra 0 e 30Hz; ciò costituisce un *disturbo* per l'individuo, in quanto produce sull'organismo effetti negativi che vanno dal semplice disagio a sensazione di malessere più pesanti.

L'entità dei disturbi prodotti dal flicker è dipendente, oltre che dalle caratteristiche di sopportabilità del soggetto e dal tempo di esposizione, anche dalla severità del flicker medesimo. Per questo motivo, già ormai diversi anni fa, sono state effettuate indagini sia di tipo deterministico che statistico, allo scopo di conoscere con sufficiente approssimazione le relazioni fra la modulazione del flusso luminoso (intesa come ampiezza e frequenza della variazione della luce emessa da una lampada inizialmente di tipo incandescente) e il 'fastidio' che esso produce sull'organismo umano. Ma per poter effettuare delle misure su individui fu necessario definire una tipologia nelle prove da fare; si considerò dunque come sorgente luminosa una lampada incandescente da 60W alimentata da una alimentazione a 50Hz modulata in bassa frequenza da 0 fino a 30Hz e con ampiezza della

modulazione variabile da zero fino a qualche per cento della fondamentale. Dalla elaborazione statistica dei dati ottenuti risultò che il massimo fastidio su una persona viene prodotto quando la modulazione della luce è a 8.8Hz.

Successivamente fu introdotta una grandezza per la stima della severità del flicker luminoso a partire da misure sulla tensione di rete, il P_{st} . Esso è definito come severità del flicker di breve durata, a causa della 'breve' durata di acquisizione (10min) della tensione di rete necessaria per effettuare la analisi statistica. Il P_{st} è ricavato per via statistica (nel modo descritto nel paragrafo 3.3) analizzando la tensione di rete.

La grandezza P_{st} viene proposta come mezzo per definire una scala della severità del flicker, fermo restando che il suo scopo principale è quello di fornire un metodo accettato in campo internazionale per la valutazione della severità suddetta. La UIE (Unione Internazionale di Elettrotecnica, che ha diramato le specifiche in merito) non propone un valore limite per il P_{st} , in quanto questo è chiaramente compito dei vari Comitati Normativi Nazionali e Internazionali.

Tuttavia, la UIE è conscia della necessità di fornire una guida sull'utilizzo del flickermetro per la valutazione dei valori limite di severità del flicker.

Un valore limite per P_{st} potrebbe essere posto come maggiore o minore rispetto all'unità secondo l'applicazione, tenendo conto del fatto che nelle prove di laboratorio una grossa fetta di osservatori considera i flicker fastidiosi quando $P_{st}=1$.

Esiste anche un indice definito come severità del flicker di lunga durata o P_{lt} per misure di flicker che debbano essere effettuate per un periodo maggiore a 10min. Esso è in stretta relazione col P_{st} mediante la relazione:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}}$$

In tal caso la durata delle misure va generalmente da un minimo di 2 ore fino a sette giorni.

La attuale normativa CEI EN50160 stabilisce che in condizioni di normale esercizio, per qualsiasi periodo di una settimana, il livello di severità di lunga durata del flicker P_{lt} , dovuto alle fluttuazioni della tensione, dovrà essere minore o uguale a uno per il 95% del tempo.

3.2 Studio teorico del comportamento di una lampada incandescente

Nel seguito sarà descritto lo studio del comportamento di una lampada incandescente in presenza di alimentazione sinusoidale; successivamente sarà esaminato il comportamento in alcuni casi di tensione di alimentazione distorta, con particolare riferimento a quelli che generano flicker luminoso.

3.2.1 Analisi con tensione di alimentazione sinusoidale

Allo scopo di formulare un modello matematico in grado di descrivere il comportamento di una lampada incandescente in presenza di flicker si consideri il corrispondente circuito termico equivalente riportato in figura 3.1.

Il filamento è rappresentato da una resistenza termica R_θ (espressa in $^\circ\text{C}/\text{W}$ e assunta costante in quanto la trasmissione del calore avviene prevalentemente per conduzione) in parallelo con una capacità termica C_θ (espressa in $\text{Ws}/^\circ\text{C}$). La temperatura T , differenza fra la temperatura del filamento T_F (migliaia di gradi) e quella ambiente T_a (differenza che, considerando come unità di misura il grado Celsius, è circa equivalente a quella del filamento) sul parallelo di $R_\theta C_\theta$, è dovuta al flusso istantaneo di calore pari alla potenza istantanea $p = v^2/R$ dissipata dal filamento (con v si indica il valore istantaneo della tensione di alimentazione e con R la resistenza elettrica del filamento). In prima approssimazione R sarà assunta costante, in quanto nell'intorno del punto di lavoro la sua variazione può essere ritenuta trascurabile.

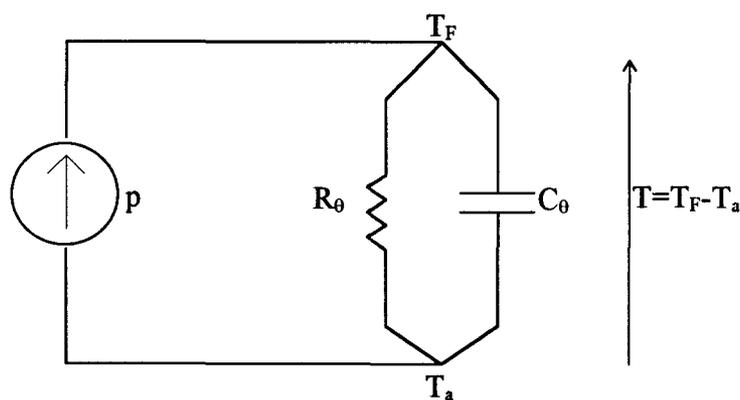


Figura 3.1 Circuito termico equivalente di una lampada incandescente

Il flusso di calore nel circuito di figura 3.1 è espresso dalla equazione:

$$p = C_{\theta} \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_{\theta}} \quad (3.1)$$

Se si indica con $v = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$ la tensione di alimentazione, la potenza istantanea è data da:

$$p = \frac{V^2}{R} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (3.2)$$

e la temperatura del filamento ricavata dalla (3.1) è quindi:

$$T = T_0 + \Delta T \cos(2\omega t - \beta_2) \quad (3.3)$$

dove $T_0 = V^2/R$ è il valore medio della temperatura, $\Delta T = T_0 / \sqrt{1 + (2\omega\tau_{\theta})^2}$ è la variazione della temperatura attorno al valore medio, $\tau_{\theta} = R_{\theta}C_{\theta}$ è la costante di tempo del filamento ed infine $\beta_2 = 2\omega\tau_{\theta}$.

Il flusso luminoso λ prodotto dalla lampada è funzione della geometria e delle caratteristiche fisiche della lampada stessa ed è inoltre funzione non lineare della temperatura del filamento T . Generalmente esso è espresso da un esponenziale del tipo:

$$\lambda = kT^{\alpha}. \quad (3.4)$$

Per una lampada incandescente alimentata a 120V e con una potenza p compresa fra 45 e 200W, la costante di tempo τ_{θ} varia corrispondentemente fra 20 e 120ms. Per una frequenza di rete di 60Hz, ciò determina una variazione relativa della temperatura $\Delta T/T_0$ che è compresa corrispondentemente fra 0.066 e 0.011. Poiché si può osservare che la variazione relativa di temperatura è piccola rispetto al suo valore medio, ne deriva che anche la corrispondente variazione del flusso luminoso è piccola.

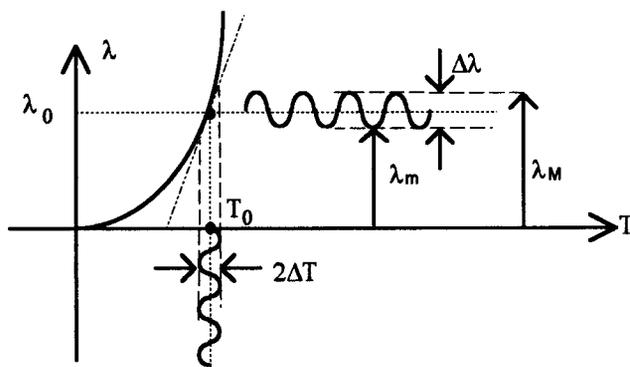


Figura 3.2 Flusso luminoso λ in funzione della temperatura del filamento T e corrispondente linearizzazione attorno al punto di lavoro λ_0, T_0 .

Ciò permette di linearizzare la (3.4) attorno al punto di lavoro λ_0, T_0 (vedi figura 3.2) ottenendo:

$$\lambda = \lambda_0 + m(T - T_0) \quad (3.5)$$

dove

$$\lambda_0 = kT_0^\alpha \quad \text{e} \quad m = \alpha k T_0^{\alpha-1}. \quad (3.6)$$

Sostituendo la (3.3) nella (3.5) si ottiene l'espressione del flusso luminoso di una lampada incandescente:

$$\lambda = k(R_0 / R)^\alpha V^{2\alpha} - m\Delta T \cos(2\omega t - \beta_2) = \lambda_0 - m\Delta T \cos(2\omega t - \beta_2) \quad (3.7)$$

Il primo termine λ_0 a secondo membro della (3.7) rappresenta il valore medio del flusso luminoso, mentre il secondo termine è un termine a frequenza doppia della fondamentale (100Hz o 120Hz se la frequenza di rete è a 50Hz o 60Hz) e dunque, per le considerazioni svolte nel paragrafo 3.1.1 non è direttamente osservabile dall'occhio umano.

3.2.2 Analisi con tensione di alimentazione non sinusoidale

Nel caso generale una tensione di rete non sinusoidale può essere divisa in quattro termini:

$$v = v_1 + v_H + v_{IH} + v_{SH} \quad (3.8)$$

in cui $v_1 = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$ è il termine a frequenza di rete, $v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t + \varphi_h)$ contiene le armoniche, cioè h è intero, $v_{IH} = \sqrt{2} \sum V_i \sin(i\omega t + \varphi_i)$ contiene le interarmoniche, cioè $i > 1$ ma non intero, ed $v_{SH} = \sqrt{2} \sum V_s \sin(s\omega t + \varphi_s)$ contiene le subarmoniche, cioè $s < 1$.

In questo caso l'espressione della potenza istantanea $p = v^2/R$ risulta data da:

$$p = \frac{v^2}{R} \approx (v_1^2 + v_H^2 + v_{IH}^2 + v_{SH}^2 + 2v_1v_H + 2v_1v_{IH} + 2v_1v_{SH})/R \quad (3.9)$$

I prodotti $v_H v_{IH}$, $v_H v_{SH}$, e $v_{IH} v_{SH}$ possono essere trascurati poiché in condizioni normali il loro valore risulta sufficientemente inferiore rispetto alla somma dei sette termini della (3.9), la cui espressione completa è data da:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= V^2 (1 - \cos 2\omega t) \\ v_H^2 &= \sum V_h^2 \{1 - \cos[2(h\omega t + \varphi_h)]\} \\ v_{IH}^2 &= \sum V_i^2 \{1 - \cos[2(i\omega t + \varphi_i)]\} \\ v_{SH}^2 &= \sum V_s^2 \{1 - \cos[2(s\omega t + \varphi_s)]\} \\ 2v_1v_H &= \sum VV_h \{ \cos[(h-1)\omega t + \varphi_h] - \cos[(h+1)\omega t + \varphi_h] \} \\ 2v_1v_{IH} &= \sum VV_i \{ \cos[(i-1)\omega t + \varphi_i] - \cos[(i+1)\omega t + \varphi_i] \} \\ 2v_1v_{SH} &= \sum VV_s \{ \cos[(1-s)\omega t - \varphi_s] - \cos[(s+1)\omega t + \varphi_s] \} . \end{aligned}$$

Considerando solamente i termini che possono generare una modulazione visibile del flusso luminoso, l'espressione della temperatura T si riduce a soli tre termini:

$$T = T_0 + T_{IH} + T_{SH} \quad (3.10)$$

dove

$$T_0 = \frac{V_{rms}^2}{R} R_0 \quad (3.11)$$

è il valore medio della temperatura,

$$V_{rms}^2 = V^2 + V_H^2 + V_{IH}^2 + V_{SH}^2 \quad (3.12)$$

è il valore efficace della tensione 'v', con

$$V_H^2 = \sum V_h^2; \quad V_{IH}^2 = \sum V_i^2; \quad V_{SH}^2 = \sum V_s^2.$$

Il secondo termine a secondo membro della (3.10) è dato da:

$$T_{IH} = R_0 \frac{V}{R} \sum_{1 < i < 1.5} V_i \frac{\cos[(i-1)\omega t + \varphi_i - \beta_{i-1}]}{\sqrt{1 + [(i-1)\omega\tau_0]^2}} \quad (3.13)$$

con $\tan \beta_{i-1} = (i-1)\omega\tau_0$.

Esso rappresenta il contributo delle interarmoniche di ordine 'i'. T_{IH} è una componente della temperatura che varia nel tempo; tuttavia solo quelle fluttuazioni con frequenze minori di 30Hz causano fluttuazioni luminose visibili all'occhio umano. Se la frequenza di rete è a 60Hz, risulta che solo le interarmoniche per cui

$$1 < i < 1.5 \quad (3.14)$$

produrranno una fluttuazione del flusso luminoso visibile all'occhio (se la fondamentale è a 50Hz allora vale la relazione $1 < i < 1.67$).

Il terzo termine a secondo membro della (3.10) è dato da:

$$T_{SH} = \sum_{0.5 < s < 1} \frac{V V_s R_0}{R} \frac{\cos[(1-s)\omega t - \varphi_s - \beta_{s-1}]}{\sqrt{1 + [(1-s)\omega\tau_0]^2}} \quad (3.15)$$

con $\tan \beta_{s-1} = (1-s)\omega\tau_\theta$.

Esso rappresenta il contributo delle subarmoniche di ordine 's'. La condizione di modulazione visibile impone che, per una fondamentale a 60Hz, debba essere soddisfatta la relazione:

$$0.5 < s < 1. \quad (3.16)$$

In conclusione l'espressione del flusso luminoso dato dalla (3.5) può essere scritto come:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_t \quad (3.17)$$

dove

$$\lambda_t = m(T_{IH} + T_{SH}) \quad (3.18)$$

è tempo variante, può essere avvertito dall'occhio umano, e, se sufficientemente ampio, è responsabile del fastidio chiamato 'flicker luminoso'.

Dai risultati sopra riportati si conclude che si ha flicker luminoso quando alla tensione di rete sono sovrapposte componenti con frequenze comprese fra 30 e 90Hz, relativamente alla 60Hz, oppure da 20 a 80Hz se la fondamentale è a 50Hz.

Convenzionalmente il flicker luminoso è valutato mediante l'utilizzo del flicker di tensione che viene definito come:

$$\%Flicker = 100(V_M - V_m)/V_M = 100 \Delta V/V \quad (3.19)$$

dove ΔV è la variazione del valore efficace della tensione dal valore massimo V_M al valore minimo V_m .

3.2.3 Analisi con tensione di alimentazione modulata ad onda quadra

Questo tipo di modulazione della tensione di rete risulta molto comune. Esso si osserva in situazioni in cui carichi di dimensioni rilevanti sono periodicamente inseriti e disinseriti.

L'espressione della tensione di alimentazione è data da:

$$v = \sqrt{2}V\sin\omega t \left[1 - (1-D)a + \frac{2a}{\pi} \sum \frac{\sin(k\pi D)}{k} \cos(k\Omega t - k\pi D) \right] \quad (3.20)$$

in cui $a < 1$ e rappresenta la profondità della modulazione, $k=1, 3, 5, \dots$ e D è il duty-cycle dell'onda quadra ed Ω la sua frequenza. Ponendo $\Omega/\omega=M$, la componente a frequenza di rete e le inter e subarmoniche sono date da:

$$v_1 = \sqrt{2}[1 - (1-D)a]V\sin\omega t$$

$$v_{IH} = \sqrt{2} \frac{aV}{\pi} \sum \frac{1}{k} \sin(k\pi D) \sin[(1+kM)\omega t - k\pi D], \quad \text{per } kM \text{ non intero;}$$

$$v_{SH} = \sqrt{2} \frac{aV}{\pi} \sum \frac{1}{k} \sin(k\pi D) \sin[(1-kM)\omega t + k\pi D], \quad \text{per } 0 < kM < 2.$$

In questo caso il flicker è determinato dalle interarmoniche che soddisfano la (3.14):

$$1 < 1+kM < 1.5$$

e dalle subarmoniche che soddisfano la (3.16):

$$0.5 < 1-kM < 1.$$

Entrambe le relazioni possono essere scritte come:

$$0 < kM < 0.5.$$

Il flicker di tensione in questo caso è:

$$\%Flicker = 100a$$

e produce un valore medio della temperatura del filamento data da:

$$T_0 = \frac{V^2 R_0}{R} \left[1 - D + a^2 D + 2(1-a)\sqrt{D(1-D)} \right]. \quad (3.21)$$

Le componenti della temperatura che generano flicker luminoso sono date da:

$$T_{IH} + T_{SH} = \frac{2a[1 - (1 - D)a]}{\pi} \frac{R_{\theta}}{R} V^2 \sum \frac{\sin(kM\omega t - k\pi D - \beta_{kM})}{k\sqrt{1 + (kM\omega\tau_{\theta})^2}} \quad (3.22)$$

con $k=1, 3, 5, \dots$ e $kM < 0.5$.

In figura 3.3 sono rappresentati dei risultati sperimentali ottenuti ponendo $D=0.5$, $M=0.0333$ (frequenza del flicker=2Hz), $a=0.1$ e $2\alpha=3.4$. In figura 3.4a è rappresentato l'andamento della variazione relativa di $\Delta\lambda/\lambda_M$ in funzione del flicker di tensione avendo come parametro la costante di tempo termica τ_{θ} e ponendo $M=0.15$ (flicker a 9Hz), $D=0.5$, $2\alpha=3.4$. In figura 3.4b è rappresentata $\Delta\lambda/\lambda_M$ in funzione della frequenza del flicker ($60/M$) ponendo $\tau_{\theta}=30\text{ms}$. Si conclude che tanto maggiore è la potenza della lampada (cioè tanto maggiore è la costante di tempo termica τ_{θ}), tanto minore è la variazione del flusso luminoso, a parità di flicker di tensione $\Delta V/V$.

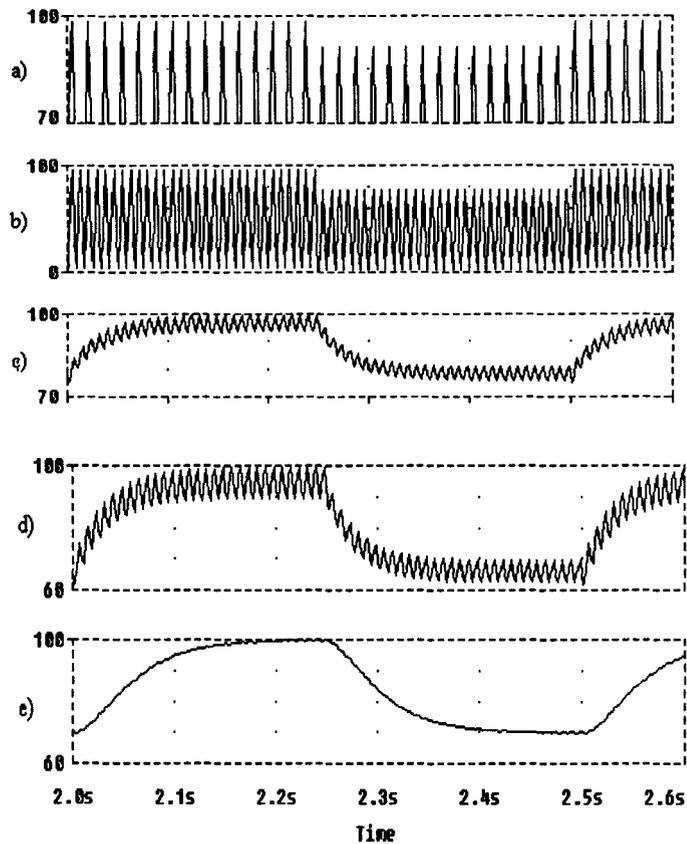


Figura 3.3 Forme d'onda ottenute mediante simulazione e relative ad un flicker di tensione ad onda quadra:

- a) Tensione v di alimentazione.
- b) Potenza sul filamento p .
- c) Temperatura T .
- d) Flusso luminoso λ .
- e) Flusso luminoso percepito dall'occhio umano.
- f) Spettro di Fourier di λ .

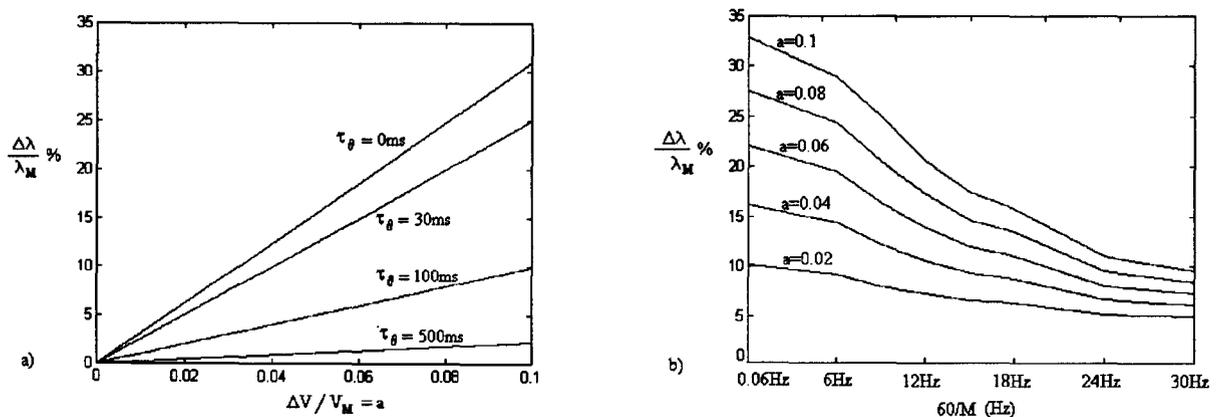


Figura 3.4 Variazione relativa del flusso luminoso λ per un flicker di tensione ad onda quadra, $D=0.5$, $2\alpha=3.4$ in funzione:

- a) della fluttuazione della tensione sulla lampada e come parametro la costante di tempo termica, $M=0.15$ (9Hz).
- b) della frequenza del flicker ($60/M$) e come parametro la variazione della tensione, $\tau_\theta=30ms$.

3.2.6 Relazione fra il numero di interarmoniche e il flicker luminoso

Il numero di interarmoniche presenti nella tensione di alimentazione di una lampada incandescente influenza, come sarà mostrato, il livello di flicker luminoso.

A tal proposito si consideri la seguente tensione modulata in bassa frequenza:

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega_0 t \left[\left(1 - \frac{a}{2} \right) + \frac{a}{2} \sin \Omega t \right] \quad (3.26)$$

Essa ha tre componenti (vedi figura 3.9):

$$v = \sqrt{2}V \left(1 - \frac{a}{2} \right) \sin \omega_0 t + \sqrt{2}V \frac{a}{4} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \sqrt{2}V \frac{a}{4} \cos(\omega_0 - \Omega)t \quad (3.27)$$

i cui valori efficaci sono

$$V_1 = \sqrt{2}V \left(1 - \frac{a}{2} \right) \quad \text{per la fondamentale}$$

$$V_{i1} = \sqrt{2}V \frac{a}{4} \quad \text{per la interarmonica}$$

$$V_{s1} = \sqrt{2}V \frac{a}{4} \quad \text{per la subarmonica}$$

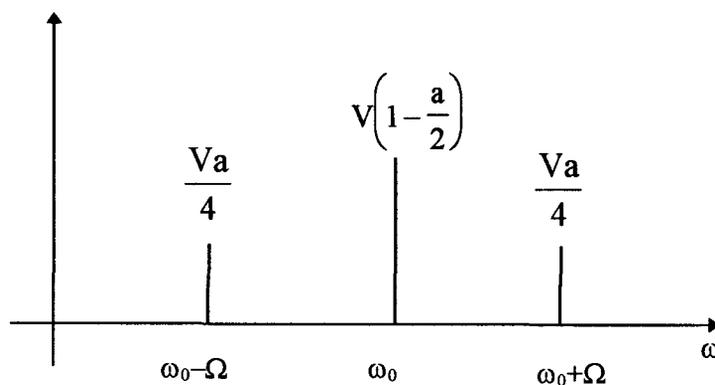


Figura 3.9 Spettro della tensione espressa nella (3.26)

Si consideri ora solo la componente interarmonica V_{i1} , che ha un valore efficace uguale a $Va/4$. Tale componente, assieme alla subarmonica di valore efficace V_{s1} , produce una modulazione della temperatura del filamento che, dalla (3.25) vale:

$$\hat{T}_1 = T_{IH} + T_{SH} \cong \frac{V^2 a}{R} \left(1 - \frac{a}{2}\right) R_\theta \frac{\sin(\Omega t)}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_\theta)^2}} \quad (3.28)$$

dove T_{IH} e T_{SH} rappresentano il contributo alla modulazione della temperatura delle interarmonica e della subarmonica; R è la resistenza del filamento della lampada e τ_θ , R_θ la costante di tempo e la resistenza termiche.

Il termine V_{i1} venga ora sostituito da N termini con frequenze dentro un intervallo $\Delta\omega$ (figura 3.10) nell'intorno della frequenza interarmonica e con valori efficaci tali da soddisfare la uguaglianza:

$$V_{i1}^2 = \sum_{k=1}^N V_k^2 \quad (3.29)$$

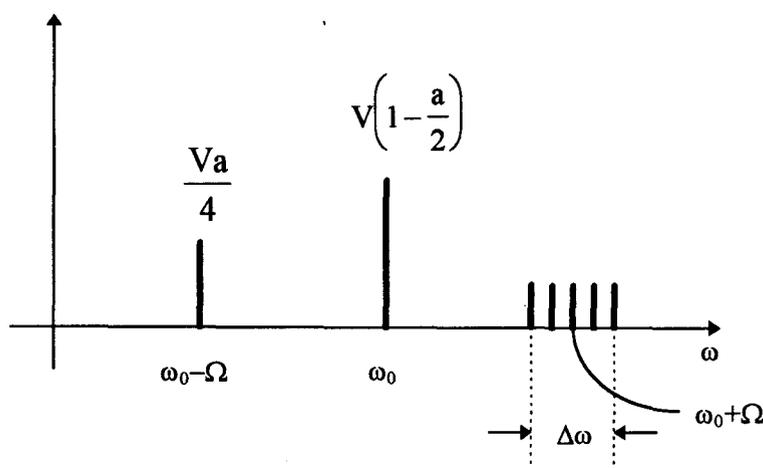


Figura 3.10 Spettro del segnale originario con la componente V_{i1} sostituito da 5 interarmoniche equivalenti

Deve essere notato che l'intervallo di frequenze $\Delta\omega$ non influisce sensibilmente sui risultati finali, come sarà mostrato più avanti.

Utilizzando la (3.28) l'energia dell'onda non viene modificata. La nuova tensione ora produce una modulazione di temperatura data da:

$$\hat{T}_m = T_{IH} + T_{SH} \cong \frac{V^2 a}{2R} \left(1 - \frac{a}{2}\right) R_\theta \frac{\sin(\Omega t - \beta_M)}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_\theta)^2}} + R_s \frac{V}{R} \sum_{k=1}^N V_k \frac{\cos\left[\left(\frac{\Omega_k}{\omega} - 1\right)\omega t\right]}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{\Omega_k}{\omega} - 1\right)\omega \tau_\theta\right]^2}} \quad (3.29)$$

con

$$1 \leq \frac{\Omega_k}{\omega} \leq 1.5. \quad (3.30)$$

Dalla (3.29) si osserva che l'intervallo $\Delta\omega$ non influenza sensibilmente il valore di \hat{T}_m quando la pulsazione Ω_k soddisfa alla (3.30).

Confrontando la (3.27) con la (3.29) e considerando la (3.28) si ha che:

$$\max\left(\hat{T}_1\right) < \max\left(\hat{T}_m\right). \quad (3.31)$$

La figura 3.11 mostra il valore di $\max\left(\hat{T}_m\right)$, normalizzato rispetto a $\max\left(\hat{T}_1\right)$, rispetto al numero di interarmoniche

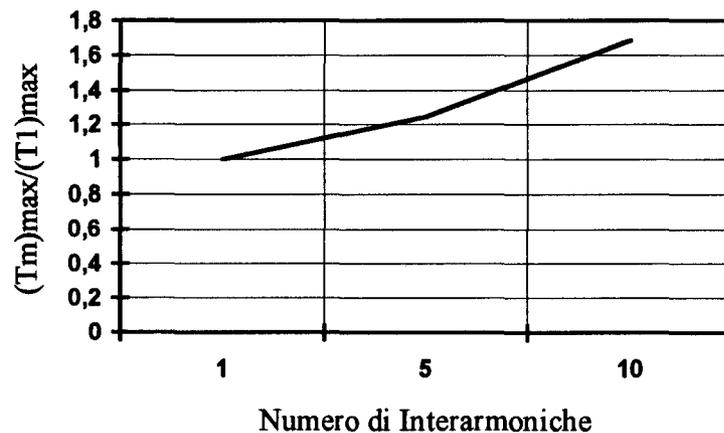


Figura 3.11 Variazione relativa di $\max\left(\hat{T}_m\right)$ rispetto al numero di interarmoniche

Il grafico fa riferimento ad un intervallo $\Delta\omega=6.9\text{Hz}$ attorno al valore di 69Hz nell'interno del quale ci sono le interarmoniche. Si può osservare che si ha un consistente incremento del picco di

temperatura quando si sostituisce la sola interarmonica presente nella tensione originaria con un numero via via crescente di interarmoniche.

La relazione fra la temperatura T e il flusso luminoso λ è:

$$\lambda = \lambda_0 + m(T_{IH} + T_{SH}) \quad (3.32)$$

dove λ_0 è il valore medio del flusso luminoso.

La figura 3.12 mostra la variazione relativa del flusso luminoso $\Delta\lambda/\lambda_{max}$ con tensione di alimentazione è data dalla (3.26) e con la interarmonica sostituita da un numero crescente di interarmonica in modo tale che la (3.29) sia soddisfatta

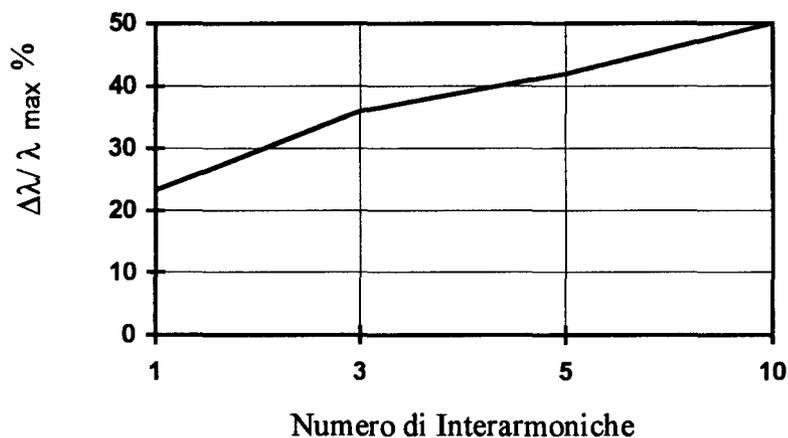


Figura 3.12 $\Delta\lambda/\lambda_{max}$ rispetto al numero di interarmoniche

Il grafico è sempre relativo ad un $\Delta\omega=2\pi 6.9=43.35\text{rad/sec}$ attorno a 69Hz.

Si nota come la variazione di flusso luminoso, cioè l'ampiezza del flicker, cresce al crescere del numero di interarmoniche presenti nella tensione di alimentazione anche se l'energia totale della tensione rimane invariata.

3.3 Descrizione del Flickermetro UIE

La struttura del flickermetro è illustrata con il diagramma a blocchi di figura 3.13 [13] e può essere divisa in due parti, delle quali ciascuna assolve a uno dei compiti che seguono:

- simulazione della risposta della catena lampada-occhio-cervello;
- analisi statistica, in tempo reale, del segnale di flicker e presentazione dei risultati.

Il primo compito viene assolto dai blocchi 2, 3 e 4 della figura 3.13, mentre il secondo dal blocco 5.

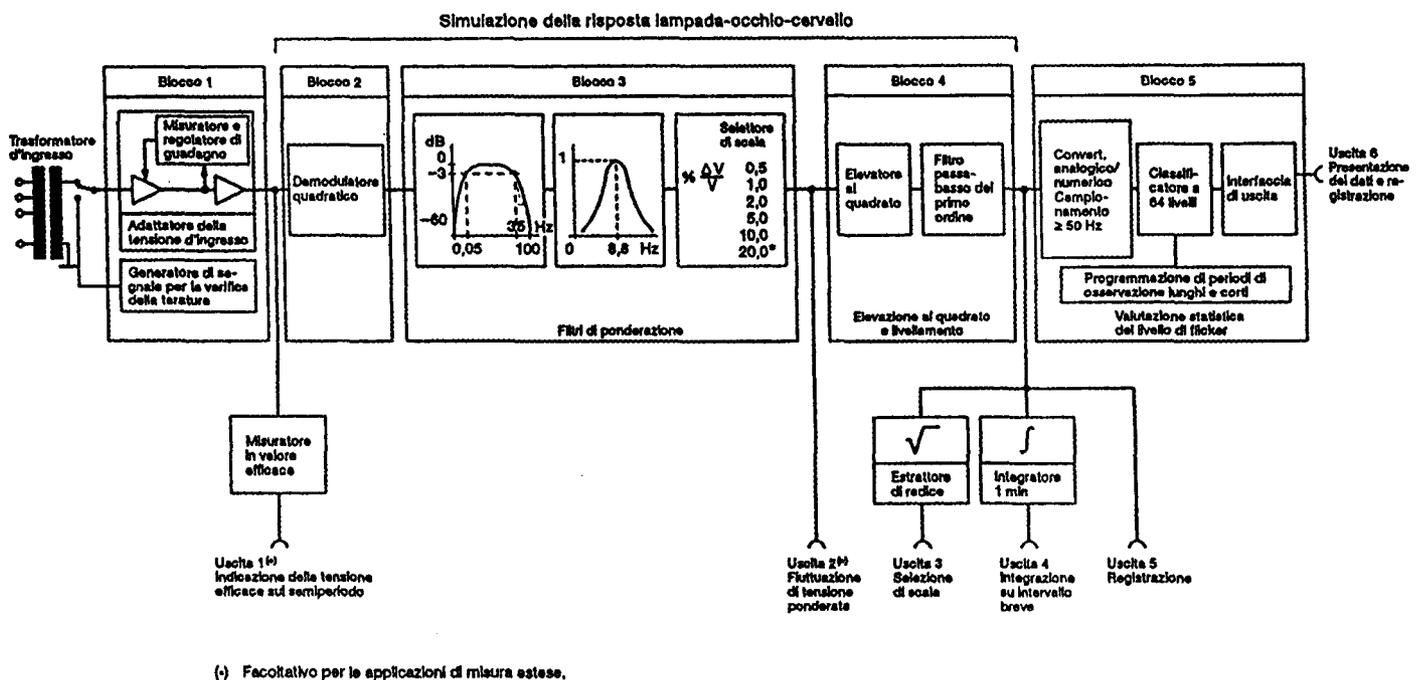


Figura 3.13 Diagramma funzionale del flickermetro UIE

Blocco 1

Il blocco 1 contiene un circuito adattatore di tensione che provvede a mantenere il valore efficace della tensione di ingresso, ad un valore costante di riferimento V_R , senza modificare la fluttuazione modulante. Esso ha un tempo di risposta (dal 10% al 90% del valore finale), ad una variazione a gradino del valore efficace d'entrata, uguale a 1 min. L'intervallo dei valori efficaci delle tensioni che possono essere applicate all'ingresso va da 40 a $504V_{eff}$. Sempre nel primo blocco esiste inoltre un generatore di segnali per verificare sul campo la taratura del flickermetro. Tale generatore fornisce un'onda sinusoidale alla frequenza di rete, modulata da un'onda quadra a 2.94Hz (50/17). La verifica

è eseguita a mezzo di un'indicazione che mostra l'allineamento con un segno o valore di riferimento.

Le caratteristiche significative di questo circuito sono:

- onda portante agganciata in fase con la rete di alimentazione;
- tasso di modulazione $\Delta V/V = 1\%$;
- livello della portante appropriato per tutte le scale di misura;
- precisione della frequenza di modulazione = 1%.

In questo modo le misure di flicker sono rese indipendenti dal livello effettivo della tensione di ingresso le cui variazioni vengono espresse come rapporto percentuale.

Blocco 2

Il blocco 2 consente di estrarre un segnale proporzionale alla potenza istantanea elevando al quadrato la tensione di ingresso riportata al livello di riferimento, simulando così il comportamento della lampada. Esso fornisce in uscita una tensione dipendente dall'ampiezza della fluttuazione modulante il segnale di ingresso. La scala di funzionamento d'ingresso del modulatore deve estendersi fino al 150% del valore di riferimento V_R .

Blocco 3

Il blocco 3 è composto da due filtri in cascata e da un selettore di scala della sensibilità che può precedere oppure seguire il circuito del filtro selettivo. I filtri hanno gli scopi che seguono:

- eliminare la componente continua e quella a frequenza doppia della frequenza della rete di alimentazione presente all'uscita del blocco precedente detto *demodulatore* (l'ampiezza delle componenti a frequenza superiore è trascurabile);
- pesare le fluttuazioni secondo la risposta in frequenza del sistema lampada-occhio-cervello.

Il filtro per la soppressione delle componenti indesiderate comprende una sezione passa-alto del primo ordine (la proposta frequenza di taglio a 3dB è di circa 0.5Hz) e una sezione passa-basso, per la quale si è adottato un filtro Butterworth del 6° ordine con una frequenza di taglio a 3dB di 35Hz.

Questo perché la componente a frequenza doppia della rete di alimentazione viene anche attenuata dal filtro di pesatura del blocco 3. Per aumentare la risoluzione, è prevista la possibilità di inserire un filtro elimina-banda regolato a questa frequenza.

Si può ritenere che una funzione di trasferimento adatta per i blocchi 2 e 3 sia data da:

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)}$$

dove s è la variabile complessa di Laplace e i valori per i parametri sono quelli riportati di seguito:

$$k=1.74802, \lambda=2\pi 4.05981, \omega_1=2\pi 9.15494, \omega_2=2\pi 2.27979, \omega_3=2\pi 1.22535, \omega_4=2\pi 21.9.$$

Il selettore di scala, sempre presente nel blocco 3, determina la sensibilità dello strumento, variando il guadagno in funzione dell'ampiezza della fluttuazione di tensione da misurare.

I campi di misura espressi in variazione relativa di tensione $\Delta V/V$ per una modulazione sinusoidale di 8.8Hz sono 0.5-1-2-5-10-20%. La scala 20% è facoltativa, poiché per ampiezze di modulazione rilevanti la non linearità del demodulatore può introdurre errori significativi.

Blocco 4

Il blocco 4 esegue due funzioni:

- elevazione al quadrato del segnale pesato del flicker per simulare la percezione non lineare occhio-cervello;
- livellamento a media mobile del segnale per simulare l'effetto di memorizzazione del cervello.

Lo stadio di elevazione al quadrato deve avere sufficienti dinamiche sia in ingresso che in uscita per normalizzare il livello del flicker al valore ammissibile a 8.8Hz. Il filtro a media mobile ha la funzione di trasferimento di un filtro passa-basso del primo ordine a resistenza e capacità con costante di tempo di 300ms.

Blocco 5

Il blocco 5 incorpora un convertitore A/D ed un microprocessore che esegue in tempo reale l'analisi del livello del flicker, permettendo così il calcolo diretto dei parametri di valutazione significativi. Un'interfaccia appropriata consente la rappresentazione dei risultati e la loro registrazione. Si fa uso di questo blocco quando si applica il metodo di misura della severità del flicker con analisi statistica. Sia che venga effettuata in tempo reale, con il blocco 5, sia in tempo differito, con la registrazione dell'uscita del blocco 4, l'analisi statistica deve essere condotta suddividendo l'ampiezza del segnale del livello di flicker in un numero appropriato di classi. La velocità di campionamento del segnale del livello di flicker è costante. Ogni volta che si presenta il valore appropriato, il contatore della classe corrispondente si incrementa di una unità. In questo modo si ottiene la funzione di distribuzione in frequenza dei valori di ingresso campionati. Al termine

del periodo di misura si ottiene la distribuzione della durata del livello di flicker in ciascuna classe. Sommando il contenuto dei contatori di tutte le classi ed esprimendo il totale parziale di ciascuna classe in rapporto al totale generale, si ottiene la funzione densità di probabilità dei livelli di flicker. Da questa poi si ottiene la funzione di probabilità cumulata utilizzata nel metodo statistico di analisi 'livello-durata'. La figura 3.14 rappresenta schematicamente il metodo di analisi statistica, limitato per semplicità di presentazione a dieci classi. Mediante poi la funzione di probabilità cumulata si ottiene, oltre che altre grandezze statistiche di interesse, anche il livello di flicker superato per una data percentuale di tempo, necessario per il calcolo del P_{st} .

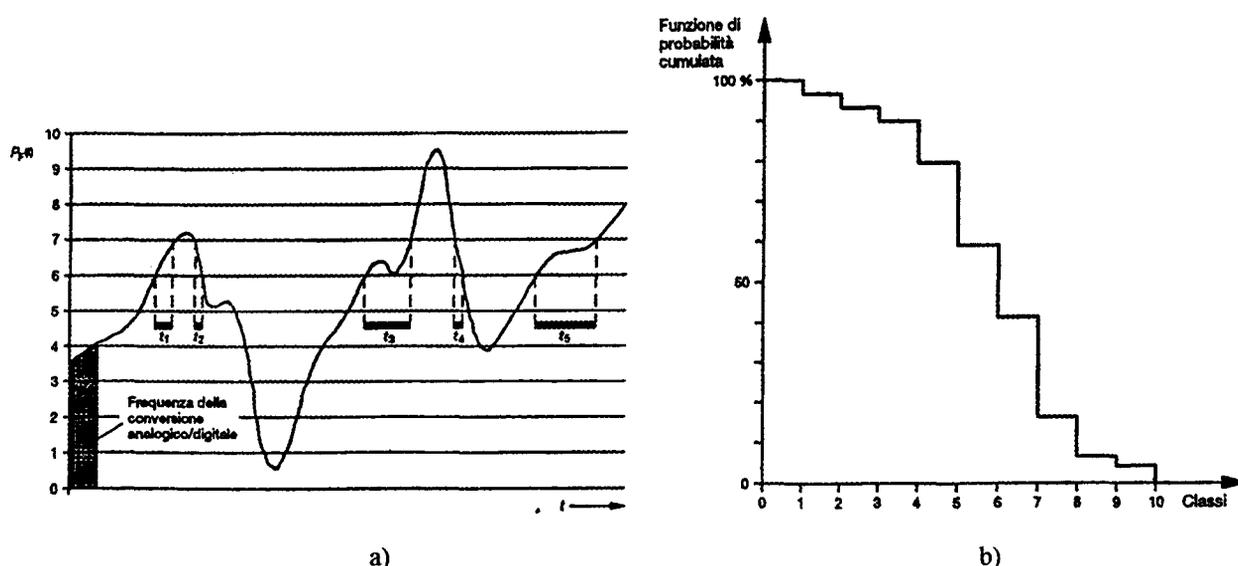


Figura 3.14 a) Livello di flicker rappresentato in funzione della variabile tempo. È indicato, come esempio, il livello i permanenza nella classe n.7 ($T_7 = \sum_{i=1}^5 t_i$). b) Funzione della probabilità cumulata della permanenza del segnale nelle classi da 1 a 10.

La procedura di analisi statistica è eseguita esprimendo i segnali in uscita del blocco 4 in forma digitale con risoluzione di almeno 6 bit e usando almeno 64 classi. La frequenza minima di campionamento è di 50 campioni per secondo. La relazione fra il selettore di scala della sensibilità e il livello corrispondente alla classe più elevata della funzione di probabilità cumulata risultante dalla classificazione è indicata nella seguente tabella:

$\frac{\Delta V}{V} \%$	Livelli di percezione in unità della soglia di percettibilità
0.5	4
1	16
2	64
5	400
10	1600
20	6400

T_{st} può essere scelto fra 1-5-10-15 minuti, mentre T_{lt} è un multiplo intero di T_{st} , selezionabile fra 1 ed almeno 1008, cui corrisponde, per un T_{st} di 10min, un tempo di misura di 7 giorni.

Sono allo studio ulteriori sviluppi della analisi statistica.

3.3.1 Valutazione della severità del flicker su un tempo breve

Come già riferito nel capitolo 3.1, la misura della severità del flicker basata su un periodo d'osservazione $T_{st} = 10\text{min}$ è denominata P_{st} e viene denominata "di breve durata". Essa si ottiene con il metodo statistico "livello-durata" che viene effettuato dal classificatore di livello del blocco 5. Si utilizza la formula che segue:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}$$

$P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} sono detti percentili e rappresentano i livelli di flicker superati per la percentuale corrispondente del periodo di osservazione; ad esempio $P_{0.1}$ indica il livello di flicker superato solo per lo 0.1% del periodo di osservazione. Il periodo di osservazione $T_{st}=10\text{min}$ è stato assunto convenzionalmente.

3.3.2 Valutazione della severità del flicker su un tempo lungo

Il periodo di 10 minuti su cui si basa la valutazione della severità del flicker su un tempo corto è adatto a valutare le perturbazioni causate da sorgenti singole che hanno un ciclo di funzionamento breve. Quando si tratta di tenere in considerazione sia gli affetti combinati di carichi multipli di disturbo funzionanti in modo aleatorio (per esempio saldatrici, motori), sia sorgenti di flicker con cicli di funzionamenti lunghi e variabili (per esempio forni ad arco), è necessario indicare un criterio per la valutazione della severità del flicker su un tempo lungo. A questo scopo la valutazione della

severità del flicker su un tempo lungo P_{lt} deve essere dedotta dai valori di severità in tempo corto P_{st} , durante un periodo appropriato in relazione al ciclo di funzionamento del carico o in un periodo durante il quale un osservatore può reagire al flicker, per esempio alcune ore. A tale fine si utilizza la relazione già vista nel capitolo 3.1 e qui riportata per maggiore chiarezza.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}}$$

3.3.3 Uscite

Il diagramma a blocchi della figura 3.13 mostra un numero di uscite tra i blocchi 1 e 5. Le uscite contrassegnate da un asterisco non sono essenziali, ma possono consentire una piena utilizzazione delle potenzialità dello strumento per la rilevazione delle fluttuazioni di tensione. Si possono prendere in considerazione altre uscite facoltative.

Lo scopo della uscita facoltativa 1 e del misuratore di valore efficace associato è di permettere la visualizzazione della forma d'onda delle fluttuazioni di tensione a partire dalle variazioni del valore efficace della tensione di ingresso. Questo può essere ottenuto con l'elevazione al quadrato del segnale, l'integrazione fra i passaggi per lo zero di ciascun semiperiodo e l'estrazione della radice quadrata del segnale.

Per poter osservare con buona risoluzione piccole variazioni di tensione, è opportuno procedere ad una compensazione della componente continua.

L'uscita 2 è destinata principalmente al controllo della risposta del blocco 3 e alla sua regolazione.

L'uscita 3 dà una indicazione lineare istantanea della variazione relativa della tensione $\Delta V/V$ espressa in per cento equivalente a una modulazione con onda sinusoidale di frequenza 8.8Hz. Questa uscita è utile per scegliere la scala di misura appropriata.

L'uscita 4 fornisce l'integrale su un minuto della percezione istantanea del flicker.

L'uscita 5 rappresenta la percezione istantanea del flicker e può essere registrata con un oscillografo (registratore su carta) per una valutazione rapida sul posto o con un registratore a nastro magnetico per misure di lunga durata e per una successiva elaborazione.

L'uscita 6 del blocco 5 è connessa ad una interfaccia seriale idonea per una stampante ed un registratore a nastro magnetico. Usando un'altra interfaccia di conversione digitale/analogico, si possono ottenere direttamente da questo blocco grafici analogici della funzione della probabilità cumulata.

3.3.4 Precisione nella valutazione del P_{st}

Il metodo di classificazione utilizzato per ottenere la funzione di probabilità cumulativa può introdurre errori dovuti al numero limitato delle classi ed alla risoluzione del convertitore analogico-digitale che viene utilizzato nel flickermetro.

Ciò di solito vuol dire che i valori reali del livello associato con uno qualsiasi dei percentili selezionati P_k ($k=0.1, 1, 3, 10, 50$) non viene dato direttamente ma è compreso tra due valori noti nella distribuzione delle classi.

Se si assume che ogni percentile P_k assuma il valore medio della classe corrispondente, l'errore massimo di P_k sarà:

$$|\varepsilon_{i_{\max}}| = \frac{1}{2} \frac{F_s}{N}$$

dove N è il numero della classe del classificatore ed F_s è valore di fondo scala del campo utilizzato, essendo il campo dello strumento l'ampiezza delle variazioni di tensione, per la quale corrispondenti valori di P_{st} sono indicati con una precisione del 5% o migliore.

Supponendo che tutti i percentili coincidano con un punto finale dell'intervallo di una classe, il valore calcolato di P_{st} sarà:

$$P_{st} = \sqrt{P_{st_{\text{vero}}}^2 \pm \frac{1}{2} \frac{F_s}{N} \sum_{i=1}^5 K_i} = \sqrt{P_{st_{\text{vero}}}^2 \pm 0.2548 \frac{F_s}{N}}$$

Il valore massimo possibile di P_{st} si verificherà quando tutti i percentili P_k finiranno nella classe di livello più elevata, M_{\max} , che corrisponde in modo approssimativo al valore di fondo scala, F_s , del campo utilizzato:

$$P_{st_{\max}} = \sqrt{M_{\max} \sum_{i=1}^5 K_i} = 0.7139 \sqrt{M_{\max}}$$

Se l'effettivo P_{st} calcolato è una frazione α di $P_{st_{\max}}$ l'errore massimo relativo deve essere espresso da quanto segue:

$$\varepsilon_{\max} \% = \frac{P_{st} - P_{st\text{vero}}}{P_{st\text{vero}}} 100 = 100 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{2N\alpha^2}} - 1 \right)$$

Si può notare che l'errore massimo relativo non dipende dal campo ma solo da α e da N .

La tabella 3.1 riporta i valori minimi di P_{st} misurabili con un errore massimo del 5%, per campi differenti del flickermetro e per differenti numeri di classi del classificatore.

Tabella 3.1 Valori minimi di P_{st} misurabili con un errore del 5% per ciascun campo e tre dimensioni del classificatore

Campo del flickermetro in unità relative		4	16	64	400	1600	6400
Classi	$P_{st}/P_{st\text{max}}$	$P_{st\text{max}}$					
		1.42	2.85	5.7	14.2	28.5	57
64	0.275	0.39	0.784	1.567	3.9	7.837	15.68
128	0.19	0.27	0.542	1.083	2.698	5.415	10.83
256	0.125	0.192	0.385	0.77	1.92	3.85	7.695

Si può notare come, per evitare la necessità di troppe classi, deve essere migliorata la stima dei percentili. Sono stati allora esaminati i benefici ottenibili con una varie tecniche di interpolazione.

3.3.5 Tecniche di miglioramento della precisione di valutazione

Sono disponibili varia tecniche per ottenere una buona precisione nella valutazione del flicker in numerose situazioni. Alcune di queste tecniche sono indicate di seguito. Ciascuna può essere impiegata da sola o in combinazione con altre, posto che la precisione specificata del $\pm 5\%$ sia ottenuta su una scala sufficiente di modulazione di ampiezza della tensione di ingresso.

Nella maggior parte dei casi i valori dei percentili, P_k necessari per calcolare P_{st} , corrispondono all'intervallo di ampiezza di una classe, quindi i valori effettivi devono essere dedotti per interpolazione (o estrapolazione) dei valori delle classi effettivamente disponibili.

Interpolazione lineare

La classificazione lineare è tale che l'intera scala, F_s , del classificatore è suddivisa in N livelli discreti, ciascuno dei quali possiede una ampiezza di classe di F_s/N . n è il numero della classe alla quale appartiene il percentile P_k . La classe n contiene i livelli di uscita del flickermetro compresi fra $(n-1)F_s/N$, superato da y_{n-1} per cento dei casi-campione, e nF_s/N , superato da y_n per cento dei casi campione. Con l'interpolazione lineare il percentile P_k corrispondente a y_k per cento è:

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left[n - (y_k - y_n) \right] / (y_{n-1} - y_n)$$

Interpolazione non lineare

Quando l'interpolazione lineare non assicura una precisione sufficiente, si deve impiegare una interpolazione non lineare. La procedura raccomandata consiste nell'adattare una formula quadratica a partire dai livelli corrispondenti a tre classi consecutive sulla funzione di probabilità cumulata, CPF.

Il livello CPF si ottiene con la formula:

$$P_k = \frac{F_s}{N} \left[n - 1 + \frac{1}{2H_2} (H_1 - \sqrt{H_3}) \right]$$

dove: F_s/N è l'ampiezza di una classe, $H_1 = 3/2 y_{n-1} - 2y_n + 1/2 y_{n+1}$, $H_2 = 1/2 y_{n-1} - y_n + 1/2 y_{n+1}$, $H_3 = H_1^2 - 4H_2(y_{n-1} - y_k)$ e con y_n la probabilità in termini percentuali corrispondente alla classe n .

Estrapolazione non lineare

Può accadere che una o più percentuali di interesse, P_k , si collochino nell'intervallo della prima classe del classificatore. L'esperienza ha dimostrato che l'interpolazione fra il punto zero e il punto situato al limite della prima classe dà cattivi risultati, perché ciò comporta la supposizione che il livello zero verrà superato con il 100% delle probabilità. In pratica una tipica funzione di probabilità cumulata può intersecare l'asse delle probabilità ben al di sotto del 100% per poi risalire verticalmente l'asse. Un sistema per ridurre gli errori in questa regione consiste nell'estrapolare la funzione di probabilità cumulata verso l'asse delle y per fornire un valore dell'ordinata all'origine, y_0 . Un algoritmo adatto ad estrarre y_0 è:

$$y_0 = (3y_1 - 3y_2 + y_3).$$

Classificazione non lineare

Un classificatore può essere utilizzato con maggiore efficienza e precisione se gli intervalli di classe sono di ampiezza variabile. Per esempio può essere impiegata una classificazione logaritmica, cosa che normalmente consente l'utilizzo di un interpolatore lineare, evita il bisogno di estrapolare l'ordinata all'origine e permette di coprire l'intero campo della dinamica dei segnali di ingresso senza l'impiego di un selettore di scala della sensibilità. In alternativa si può applicare all'uscita del blocco 3 del flickermetro un classificatore lineare, ma questo rende necessaria una selezione di scala.

Prova delle prestazioni

Ciascun flickermetro, così come il suo classificatore, deve essere sottoposto a treni regolari di tensione rettangolare indicati nella Tabella che segue.

Variazioni al minuto	Variazioni di tensione $\Delta V/V$ (%)
1	2.724
2	2.211
7	1.459
39	0.906
110	0.725
1620	0.402

In ciascuna condizione la severità del flicker, P_{st} , deve corrispondere a 1.00 ± 0.05 .

Inoltre il costruttore deve determinare la scala di ampiezza, cioè il campo, delle variazioni di tensione, per la quale corrispondenti valori di P_{st} sono indicati con una precisione del 5% o migliore.

Per eseguire queste prove, l'ampiezza di $\Delta V/V\%$ indicata nella tabella deve essere aumentata e diminuita, mantenendo costante la frequenza delle variazioni, e si otterrà il valore di P_{st} .

Se, per esempio, per una frequenza uguale a sette variazioni al minuto si moltiplica la variazione della tensione d'ingresso per un fattore 3, facendola passare da 1.459 a 4.377%, allora P_{st} dovrà aumentare da $1.0 \pm 5\%$ fino a $3.0 \pm 5\%$.

La scala in cui viene mantenuta la precisione di $\pm 5\%$ è la scala di funzionamento del classificatore.

Se il flickermetro impiega un selettore di scala della sensibilità, per ciascuna scala dovrebbero eseguire prove analoghe.

3.4 Studio teorico del comportamento di una lampada fluorescente con Ballast magnetico

Come riferito nel paragrafo 3.1 gli attuali standard sul flicker luminoso e i disturbi che esso produce su una persona fanno riferimento ad una sorgente luminosa costituita da una lampada incandescente da 60W. Ma ricerche ed esperimenti sul flicker generato da una lampada fluorescente risultano alquanto sporadiche e senza alcuna pretesa di individuare indici o grandezze in grado di caratterizzare gli effetti che esso produce sull'uomo.

Una lampada fluorescente emana una luce con uno spettro del tutto diverso rispetto alla lampada incandescente. Inoltre il meccanismo di conversione dell'energia elettrica in luce differisce in modo significativo tra i due tipi di lampada. La lampada incandescente utilizza l'effetto Joule ed ha una caratteristica $v-i$ (vedi figura 3.15) che, nell'intorno del punto di lavoro può essere ritenuta con buona approssimazione di tipo lineare. Il valore medio della temperatura del filamento è, come già detto, circa proporzionale al quadrato del valore efficace della tensione. La distorsione della tensione non ha un effetto significativo sul flusso luminoso. Solo fluttuazioni del valore efficace ad una frequenza minore di 30Hz possono causare flicker luminoso.

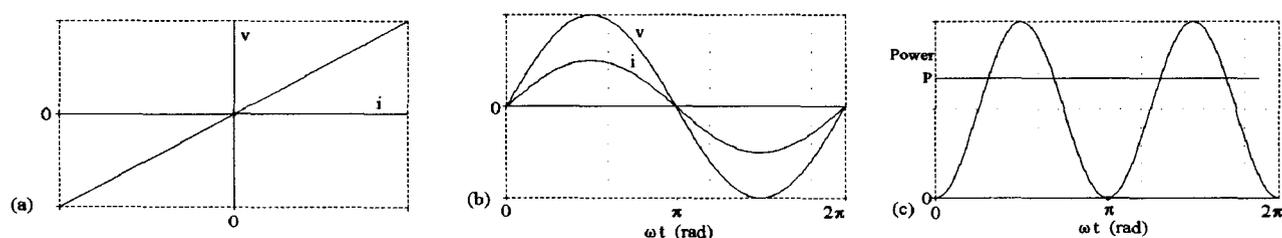


Figura 3.15 Lampade ad incandescenza

- (a) Caratteristica v/i .
- (b) Forme d'onda di tensione v e corrente i .
- (c) Potenza istantanea.

Le lampade fluorescenti appartengono alla famiglia delle lampade a scarica e convertono l'energia elettrica in luce passando attraverso la trasformazione in energia cinetica degli elettroni liberi e degli ioni. La figura 3.16a mostra la caratteristica v_a-i per una lampada a scarica funzionante a 60Hz che risulta non lineare. La potenza istantanea sviluppata dall'arco risulta $p=v_a i$; la tensione sull'arco v_a rimane pressoché costante in ogni mezzo periodo della corrente (vedi figura 3.16b). Il valore di V_a dipende dalla geometria della lampada (lunghezza, diametro) e dalle proprietà fisiche del plasma (tipo di gas e pressione).

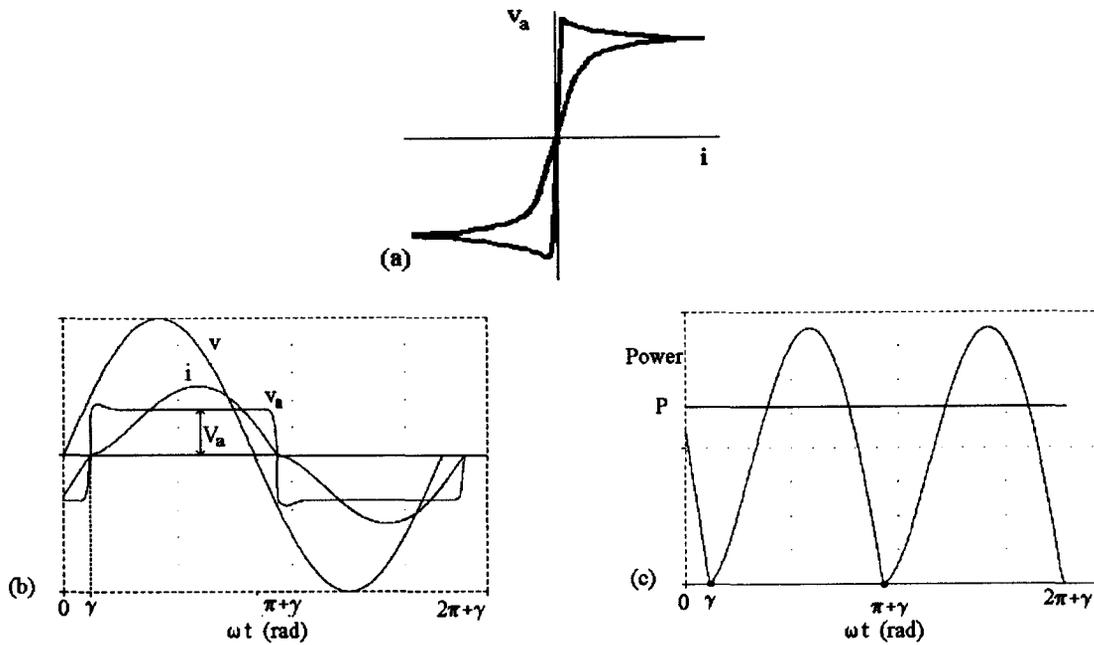


Figura 3.16 Lampada fluorescente.

- (a) Caratteristica v/i .
- (b) Forme d'onda di v , v_a , i .
- (c) Potenza istantanea.

La potenza media P prodotta nella lampada (vedi figura 3.10c) è data da:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi+\gamma} v_a i d(\omega t)$$

dove γ è l'angolo di innesco. L'intensità della corrente dipende da γ e tanto più grande è γ tanto più piccola è la corrente. Esso dipende dalla forma d'onda e dalla ampiezza della tensione di alimentazione. In figura 3.17a si può notare come una tensione con forma d'onda appiattita determina un angolo γ piccolo e conseguentemente una corrente elevata rispetto al caso di tensione con forma a campana (vedi figura 3.17b).

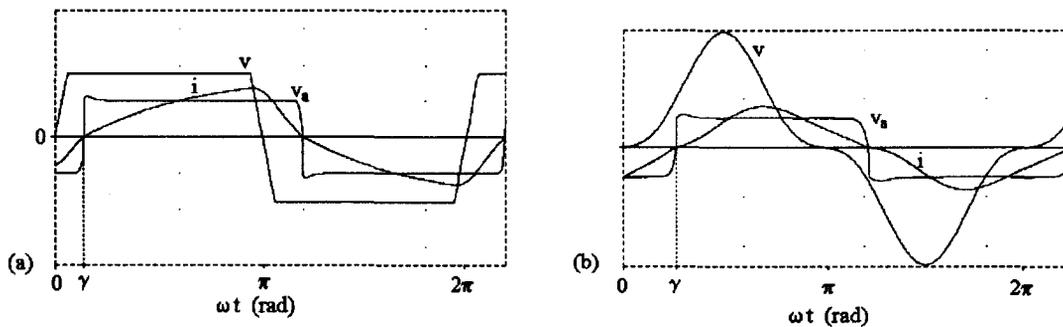


Figura 3.17 Effetto della distorsione della tensione sull'angolo di innesco γ a parità di valore efficace.

- (a) Forma di tensione appiattita.
- (b) Tensione a campana con lo stesso valore efficace del caso (a).

Il flusso luminoso generato da una lampada fluorescente è fortemente dipendente dalla potenza P . Ciò significa che ogni causa che avrà come effetto una oscillazione di γ produrrà flicker luminoso.

Esistono due sorgenti di flicker luminoso:

- Il flicker di tensione, come una modulazione ad onda quadra o ogni tipo di alterazione periodica della tensione determinata da inserzioni ripetitive di carichi che alterano la ampiezza della tensione di alimentazione.
- Fluttuazioni della tensione di alimentazione causate dalla presenza di interarmoniche.

Tali due cause sono spesso presenti entrambe e non possono essere separate.

La costante di tempo termica associata al filamento riduce in modo significativo le fluttuazioni della temperatura del filamento dovute a fluttuazioni della tensione di alimentazione. Una lampada incandescente ha una costante di tempo termica che varia (a seconda della potenza della lampada, fra un minimo di 20 ad un massimo di 150ms. Le lampade fluorescenti al contrario hanno una costante di tempo causata da un effetto di filtro del primo ordine che sussiste fra la potenza sulla lampada e il flusso luminoso che di solito è inferiore a 5ms. Ciò dunque si ripercuote in una sensibilità del flusso luminoso, a variazioni della tensione, molto più accentuata e quindi ad un flicker luminoso molto più dipendente dal flicker di tensione rispetto alla lampada incandescente.

Ovviamente ciò è vero per lampade fluorescenti con ballast magnetico, ma esistono tipi di lampade a scarica, come ad esempio quelle più recenti funzionanti a frequenze intorno a 20kHz, che hanno una caratteristica v_a-i quasi lineare e alle quali non si possono associare le considerazioni che verranno di seguito esposte.

In lampade con ballast magnetico si riscontra che una armonica di tensione a 180Hz (nella ipotesi di fondamentale a 60Hz) non causa flicker, e così per tutte le armoniche intere della fondamentale. Al contrario, se nella tensione è presente una componente interarmonica a 187Hz, si osserva un flicker luminoso.

3.4.1 Analisi della potenza su una lampada a scarica in presenza di tensione sinusoidale e distorta

Si consideri il circuito semplificato di una lampada fluorescente con ballast magnetico riportato in figura 3.18a.

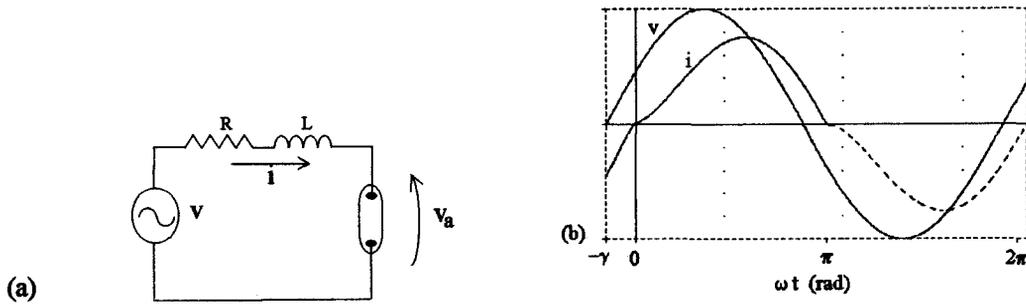


Figura 3.18 Lampada fluorescente con ballast magnetico.

(a) Circuito semplificato.

(b) Forme d'onda di tensione e corrente.

Se la tensione di alimentazione è perfettamente sinusoidale e si assume per semplicità che la tensione d'arco sia costante e pari a V_a , allora, con riferimento alla figura 3.18a, durante il semiperiodo positivo della corrente vale la seguente relazione:

$$\sqrt{2}V \sin(\omega t + \gamma) = V_a + L \frac{di}{dt} \quad (3.33)$$

Integrando la (3.33) si ottiene l'espressione della corrente:

$$i = k - \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \cos(\omega t + \gamma) - \frac{V_a}{\omega L} \omega t. \quad (3.34)$$

Le condizioni al contorno necessarie per ottenere il valore di 'k' e dell'angolo 'γ' (in condizioni stazionarie) sono: $i=0$ ad $\omega t=0$ e π ; di conseguenza si ottiene:

$$k = \pi V_a / 2\omega L$$

$$\cos(\gamma) = \pi V_a / 2\sqrt{2}V. \quad (3.35)$$

Di conseguenza la corrente nell'intervallo $0 < \omega t < \pi$ è:

$$i = \frac{V_a}{\omega L} \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) - \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \cos(\omega t + \gamma). \quad (3.36)$$

Quindi il valore medio della potenza P risulta:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_a i d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}VV_a}{\omega L} \cos(\gamma). \quad (3.37)$$

Tale risultato mostra che una modulazione dell'angolo γ causa una modulazione della potenza attiva P e quindi del flusso luminoso λ .

Se si considera una tensione di alimentazione 'v' modulata sinusoidalmente in bassa frequenza

$$v = \sqrt{2}V \left[1 - \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \cos(\Omega t) \right] \text{sen}(\omega t); \quad a = \frac{\Delta V}{V} \quad (3.38)$$

tale che $\Omega < 0.5\omega$ e $a < 0.1$, allora l'escursione della sua ampiezza da $\sqrt{2}V$ a $\sqrt{2}(1-a)V$, e viceversa, causa una variazione periodica di γ , e quindi la forma d'onda della corrente risulta distorta per due motivi: per la variazione della ampiezza della tensione e per la variazione dell'angolo di innesco γ .

Sostituendo la (3.34) e la (3.38) nella (3.37) si ottiene:

$$P = \frac{1}{\omega L} \sqrt{8V^2 V_a^2 \left[1 - \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \cos(\Omega t) \right]^2 - \pi^2 V_a^2} \cong P_M \left\{ 1 - \frac{a[1 + \cos(\Omega t)]}{2 \text{sen}^2(\gamma_M)} \right\} \quad (3.39)$$

dove P_M è calcolato dalla (3.36) e risulta la potenza dell'arco in condizioni normali con tensione di alimentazione sinusoidale di ampiezza $\sqrt{2}V$ e l'angolo γ_M è ottenuto dalla (3.34).

Quando la tensione di alimentazione è modulata, la variazione relativa della potenza sulla lampada ricavata dalla (3.38) vale:

$$\frac{\Delta P}{P_M} = \frac{a}{\text{sen}^2(\gamma_M)}.$$

Per valori tipici di V_a/V come ad esempio $0.2 < V_a/V < 0.6$ e $a = 0.05$ risulta $0.052 < \Delta P/P_M < 0.089$.

Nel caso di lampada incandescente lo stesso flicker di tensione determina una variazione relativa di potenza pari a

$$\frac{\Delta P}{P_M} = 2a = 0.1.$$

Tali risultati mostrano che esiste una differenza tra le risposte al flicker di tensione delle due lampade.

Nella ipotesi di considerare una interarmonica presente nella tensione di rete, la differenza fra il flicker luminoso delle due lampade diventa drasticamente elevata.

Si consideri a tal proposito una tensione di alimentazione data da:

$$v(t) = V \cos(\omega t + \gamma) + V_i \cos(\omega_i t) \quad (3.40)$$

dove V ed $\omega = 2\pi f$ rappresentano l'ampiezza e la pulsazione della fondamentale, ed V_i ed ω_i rappresentano ampiezza e pulsazione di una componente interarmonica.

La tensione d'arco, come risulta dalla figura 3.17a e 3.17b, è rappresentabile da un'onda quadra con duty-cycle variabile periodicamente con pulsazione ω_i . Ciò determina, sullo spettro di tale tensione, la presenza di bande laterali attorno alle frequenze armoniche caratteristiche di un'onda quadra, come si può osservare in figura 3.19. L'espressione di tale tensione è, con buona approssimazione, data da:

$$v_a \cong \frac{4V_a}{\pi} \left[\cos(\omega t) + w(V_i, 1) \cos(\omega + \Delta_1 \omega) t + w(V_i, 1) \cos(\omega - \Delta_1 \omega) t + \cos 3\omega t + w(V_i, 3) \cos(3\omega + \Delta_3 \omega) t + w(V_i, 3) \cos(3\omega - \Delta_3 \omega) t \right] + \dots \quad (3.42)$$

in cui $\Delta_k \omega = |k\omega - \omega_i|$ e $w(V_i, k)$ è un coefficiente proporzionale all'ampiezza V_i della interarmonica ed inversamente proporzionale all'ordine armonico k (1, 3, 5, 7, ...) delle componenti che formano l'onda quadra.

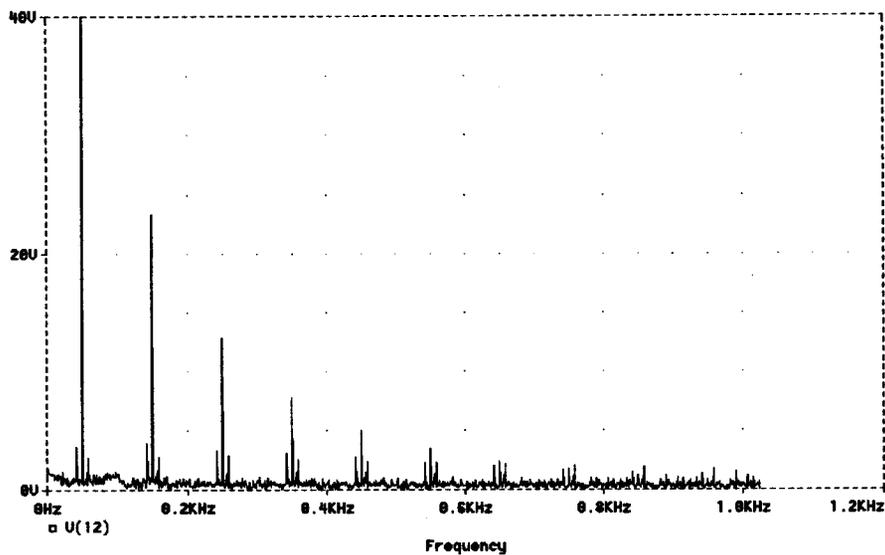


Figura 3.19 Spettro della tensione d'arco v_a .

Con riferimento alla figura 3.18a la corrente i , necessaria per il calcolo della potenza sulla lampada e quindi del flusso luminoso, viene calcolata come

$$i \cong \left\{ \frac{V}{\omega L} \text{sen}(\omega t + \gamma) + \frac{V_i}{\omega_i L} \text{sen} \omega_i t - \frac{4V_a}{\pi} \left[\frac{1}{\omega L} \text{sen}(\omega t) + \frac{w(V_i,1)}{(\omega + \Delta_1 \omega)L} \text{sen}(\omega + \Delta_1 \omega)t + w \frac{(V_i,1)}{(\omega - \Delta_1 \omega)L} \text{sen}(\omega - \Delta_1 \omega)t + \frac{1}{3\omega L} \text{sen} 3\omega t + \frac{w(V_i,3)}{(3\omega + \Delta_3 \omega)L} \text{sen}(3\omega + \Delta_3 \omega)t + \frac{w(V_i,3)}{(3\omega - \Delta_3 \omega)L} \text{sen}(3\omega - \Delta_3 \omega)t + \dots \right] \right\} \quad (3.43)$$

Se ora si effettua il prodotto $p=v_a i$, cioè si moltiplica la (3.42) con la (3.43), si ottengono in particolare termini del tipo

$$w(V_i, k) \cos \Delta_k \omega t . \quad (3.44)$$

Se ω_i è tale per cui $|k\omega - \omega_i| \leq 2\pi 30 \text{ rad/sec}$, allora la potenza risulta modulata ad una frequenza in zona flicker, e dunque percettibile, come flusso luminoso, dall'occhio umano.

In figura 3.21 sono riportati gli andamenti della luminosità (figura 3.21d) quando la tensione di alimentazione è del tipo:

$$v = 100\sin(2\pi 60t) - 20\sin(2\pi 185t).$$

Si può constatare la presenza di un flicker luminoso a 5Hz come teoricamente dimostrato dalla (3.44).

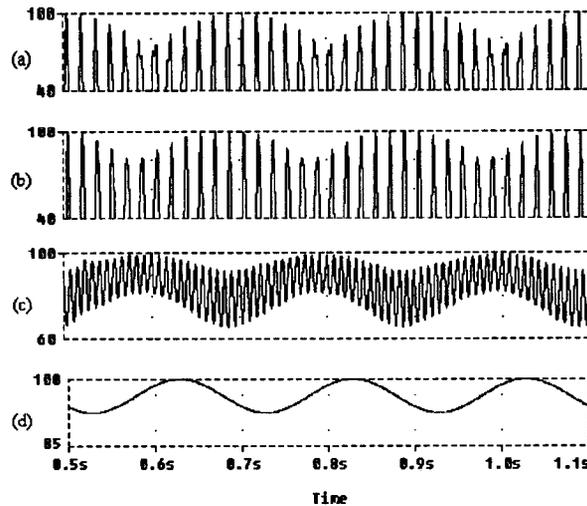


Figura 3.21 Forme d'onda ottenute mediante simulazione numerica del circuito di figura 3.12a.

- (a) Tensione di alimentazione.
- (b) Corrente nel circuito
- (c) Potenza istantanea sulla lampada.
- (d) Fluttuazione percepita del flusso luminoso.

In figura 3.22 è rappresentata la variazione relativa di potenza in funzione della frequenza interarmonica. La frequenza fondamentale è di 60Hz. Si può osservare che in corrispondenza di 180Hz (corrispondente alla prima delle armoniche presenti nello spettro della v_a) si ha un incremento della variazione luminosa, e dunque del flicker, determinato dalla intermodulazione espressa dalla (3.44). In figura 3.23 invece è riportata, come termine di confronto, la variazione di valore efficace della tensione di alimentazione (espressiva della variazione di luminosità in una lampada incandescente) e si può dedurre che nell'intorno di 180Hz non esiste alcun incremento di modulazione ma, viceversa, vi è un andamento monotonicamente decrescente di detta variazione.

3.5 Comportamento del flickermetro UIE nel caso di lampade fluorescenti

Dalla analisi delle dinamiche che concorrono al flicker in lampade incandescenti e fluorescenti viste nei paragrafi precedenti, si evince che i criteri che permettono di misurare il flicker in lampade incandescenti sono alquanto diversi da quelli per lampade fluorescenti. A tal proposito sono state effettuate delle prove di laboratorio su una lampada incandescente da 60W e su una fluorescente da 30W per verificare il comportamento del flickermetro UIE a parità di tensione di alimentazione distorta.

Tale tensione è stata modulata in ampiezza da una componente interarmonica a frequenza variabile e con ampiezza tale da provocare un sensibile flicker segnalato dal flickermetro ($P_{st}=6$) quando la frequenza della interarmonica era di 58Hz e quella di rete 50Hz.

La figura 3.25 è riportato un grafico complessivo [30] in cui sono rappresentate le curve del P_{st} , della variazione del flusso luminoso ricavata mediante un fotodiode e della variazione della potenza sulla lampada. Si vuole focalizzare l'attenzione sulle frequenze attorno a 150Hz in cui si osserva un P_{st} fornito dal flickermetro pari a zero e una variazione di luminosità (e anche di potenza) riscontrate dal trasduttore utilizzato del tutto non trascurabili.

Le motivazioni di tale comportamento del flickermetro sono da ricercarsi tra le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti. Il flickermetro, analizzando la tensione di alimentazione e utilizzando il modello interno della lampada incandescente, non rileva tali frequenze in quanto esterne alla zona flicker. Invece, proprio dalla interazione fra le medesime e le componenti di ordine dispari della tensione di alimentazione presente sulla lampada, nascono delle componenti di potenza attiva, e quindi di luminosità, in bassa frequenza, e quindi in zona flicker. Esse nascono come prodotto di intermodulazione.

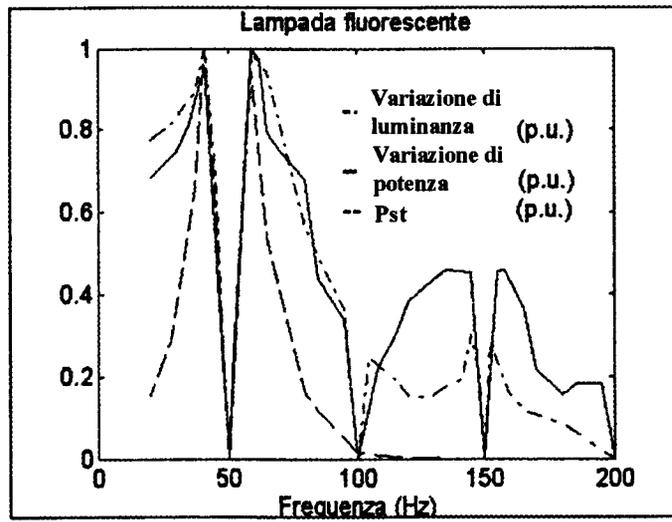


Figura 3.25 Andamento del P_{st} , della variazione della potenza attiva sulla lampada e della variazione del flusso luminoso (e quindi della luminanza) rilevata da un fotodiode.