

サイリスタ調光の場合のけい光放電灯の 高調波について (第3報)

大島利彦*, 小野訓*

(1972年9月10日受理)

Harmonic Waves of Fluorescent Lamp by Thyristor Dimming (No. 3)

Toshihiko ŌSHIMA and Kun ONO

Abstract: — We had reported the electrical characteristics and analyzed results of harmonic waves contained in the circuit of fluorescent lamp in case of the thyristor dimming. Generally, pulsation of the luminous flux of fluorescent lamp is twice as large as the frequency of electrical source and proportional to the lamp power. In this paper, we reported the experimental study of the relationship between luminous flicker and the lamp power in case of the thyristor dimming, and on the effect of harmonic waves for the noise and vibration of ballast core measuring lamp power by Analogue Multiplier.

1. ま え が き

サイリスタ調光の場合のけい光放電灯の電流ならびに電圧波形は高調波を多く含み、その結果、電力波形はひずみ波になる。一般にけい光灯の発光光束はこのような電力波形に近似して脈動することが知られているが、⁽¹⁾両者の脈動に関する実験的な考察はあまり見当らない。筆者らは、最近開発されたアナログ乗算器(シリコン半導体を用いたモールド形モジュール)を用いてサイリスタ調光の場合のけい光灯の電力波形と光束波形の対応について実験的にたしかめ、両者の脈動率を比較考察した。

一方、安定器鉄心の騒音発生機構についての報告も見当らず、したがって放電灯の高調波が安定器の騒音におよぼす影響も明らかにされていない。

筆者らは安定器鉄心の騒音について、いくつかの実験と周波数分析から、この安定器鉄心の振動および騒音と高調波との関係について考察したのであわせて報告する。

* 茨城大学工業短期大学部電気工学科

** 管電力をあらわす

2. サイリスタ調光の場合のけい光灯の光束脈動

<2-1> 電力波形と光束波形の対応

サイリスタ調光の場合のけい光放電灯の電圧、電流、電力、光束の各波形を図1にします。電力の瞬時値は前報の(3)式にしますように、電流、電圧に含まれる高調波の影響により、偶数高調波を含んだひずみ波になる。

図1の(a)はサイリスタが無制御の場合の光束および電力波形をしめす。(b)は任意の点弧角 α の場合で電流の休止時間にしたがって電力波形は著しくひずみ、これに対応して光束は大きく脈動する。そして電源周波数の2倍の周波数を多く含んだ脈動波となる。以上はけい光管に塗布してあるけい光物質の残光性がない場合であるが実際の様子⁽³⁾は少し異なる。一般に電力の脈動率は次式であらわされる。

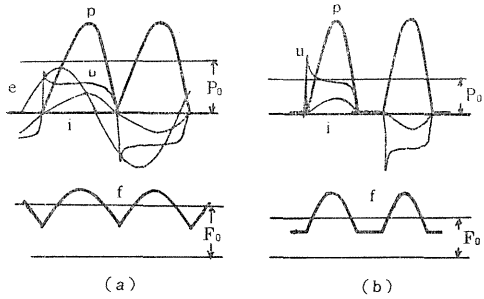


図1 サイリスタ調光の場合の電力波形と光束波形

$$k_p = \text{実効値/平均値} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2 / P_0} = |P| / P_0 \dots\dots\dots(1)$$

また光束脈動率も同じように

$$k_f = |F| / F_0 \dots\dots\dots(2)$$

であらわすものとする。ただし k_p : 電力脈動率, P_n : 高調波電力の最大値, P_0 : 平均電力, n : 偶数高調波次数, $|P|$: 電力波形実効値, k_f : 光束脈動率, $|F|$: 光束波形実効値, F_0 : 平均光束である。

<2-2> 脈動率の測定

図2はサイリスタ調光の場合の電力および光束波形の脈動測定回路をしめす。まず管電圧、電流をそれぞれ抵抗分圧器 R_1, R_2, R を通じてアナログ乗算器 M の入力 e_x, e_y 端子に接続すると出力 $e_0 = -\frac{1}{10} e_x e_y$ なる演算を行う。すなわち電力に比例した出力が

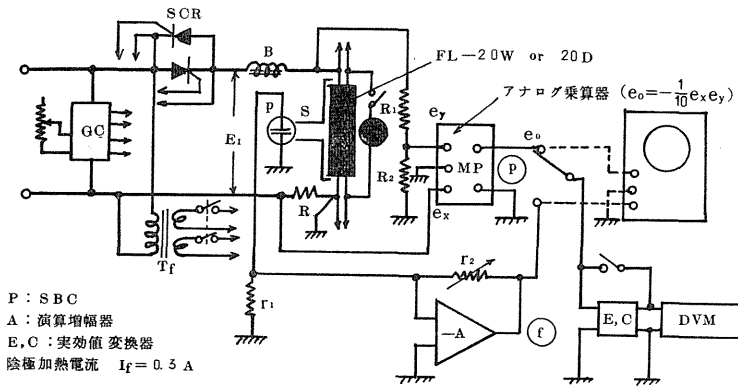


図2 サイリスタ調光時の管入力および光出力のデジタル測定回路

得られる。このアナログ乗算器は2乗の4分の1方式を用いた要素(商品名: 非線形アナログモジュール乗算器)で電圧, 電流の瞬時値の積を直接応答する。(周波数特性 D.C ~15kHz) 最大出力 10 (V) に対して2 (%) のドリフトである。もちろん入力信号は同相でなければならないが, 位相が異なる場合は補償を行う。光束波形の検出は厳密には輝度計を用いなければならないが, 装置を簡単にするため応答速度のよいシリコンブルーセル(SBC-540)を用いた。けい光管は一様に遮光し, その中心部に直径 10(mm) の窓 S をとりつけ主としてけい光の連続スペクトルを受光した。このほか水銀放電の可視ラインスペクトルがわずかに加わるので実際は混合スペクトルになる。シリコンブルーセルの光電流は温度ドリフトの極めて低い高利得演算増幅器を用いて増幅した。検出した電力および光出力波形は2現象シンクロスコープにより, また電力, 光束の平均値, 実効値はデジタル

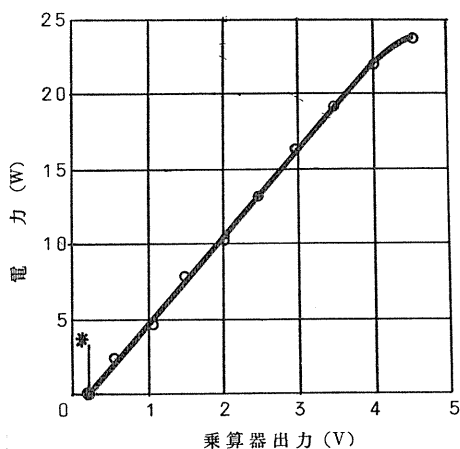


図3 アナログ乗算器の校正

温度ドリフト: 0.2 V

(出力 4 V に対して)
 $\epsilon = 5\% *$

$$e = -\frac{1}{10} e_x e_y$$

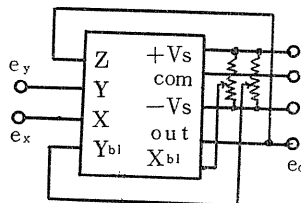


図4 アナログ乗算器の接続

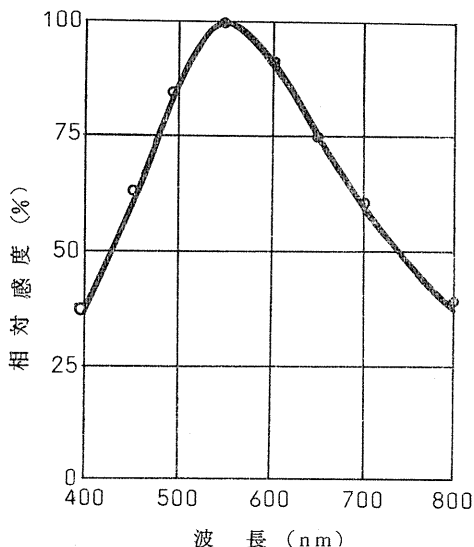
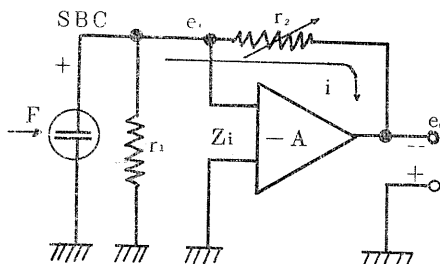


図5 シリコンブルーセル分光感度曲線



SBC-540 : シリコンブルーセル
 受光面積 $20 \times 10 = 200 \text{mm}^2$
 負荷抵抗 $r_1 = 500 \Omega$
 応答時間 $\tau = 20 \mu\text{s}$
 A : 演算増幅器 (H9F / 5639A)

図6 シリコンブルーセル増幅回路

電圧計で測定した。実効値の測定は実効値変換器(最急下法の原理)を前置した。脈動の計算は(1)(2)式を用いた。なお実験中の陰極加熱電流は 0.3(A) に保ち、室温は 27°C で行った。図3はアナログ乗算器の校正曲線をしめす。出力 4(V) 以下の直線性は良好であるが温度ドリフトはやや大きく 5(%) をしめしている。図4はアナログ乗算器のベース接続をしめす。シリコンブルーセルの分光感度は最大感度が視感度とよく一致しているが、紫外および赤外領域が約 30(%) 応答するため光束は少し誤差を含むものと思われる。(厳密には視感度補正を行う)シリコンブルーセルの応答速度、直線性は負荷抵抗によって変わるので 500(Ω) に設定した結果 20(μs) であった。この値は光電管と同程度の速さと考えられるので光束波形の時間おくれはほとんどないものと思われる。図5、図6はシリコンブルーセルの分光感度および光電流増幅回路(電流-電圧変換)をしめす。この回路の演算増幅器の出力 e_0 は

$$e_0 = -ir_2 \dots\dots\dots(3)$$

であらわされる⁽⁴⁾。ここに光電流 $i = k_1 F$ と書けば

$$e_0 = -k_2 F \dots\dots\dots(4)$$

となる。ただし $k_2 = k_1 r_2$, A: 増幅器利得 (100(db), H9F/5639F) Zi: 入力インピーダンス (10¹¹Ω), 温度ドリフト (30μV/0~60°C), F: 受光器の入力光束である。

<2-3> 実験結果および考察

はじめに、サイリスタ調光特性について従来行われたスライダック調光と比較した結果を図7にしめす。けい光灯は白色 (FL-20W) を用い、照度はけい光灯より 1(m) はなれ

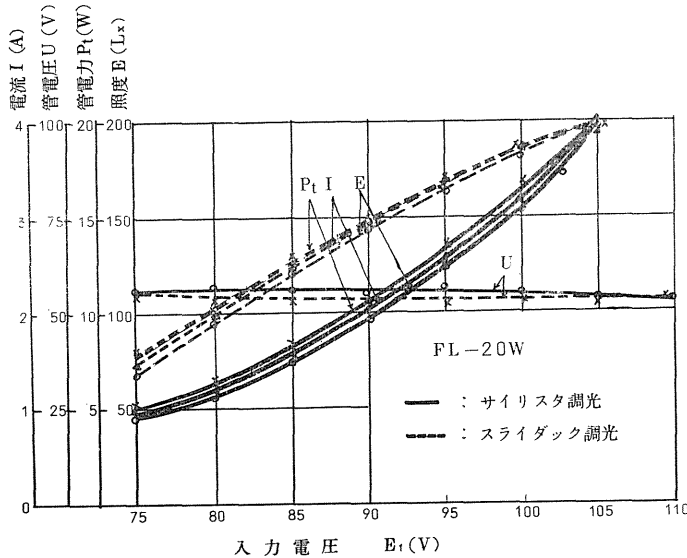


図7 けい光放電灯の調光特性

た鉛直面を測定した。図より明らかに入力電圧 $E_1 = 105(V)$ (点弧角 $\alpha = 60^\circ$) における両者の特性は全く一致しているが、調光が進むにしたがってそのへだたりは大きくなる。これ

は点弧角の増加によって電流実効値が著しく減少するものと考えられる。電圧, 電流は同位相であるから電力と照度はほぼ同じ傾向をしめしている。両者を比較するとサイリスタ調光の方があらゆる点で効率が劣るように思われる。図8は入力電圧 E_1 と電力脈動率 k_p の関係をしめす。けい光ランプは白色 (FL-20W) および昼光色 (FL-20D) の2種について比較した。 k_p の値は電力および光束変換器の誤差により必ずしも正確ではないが実測の結果, 最小値は70(%)であった。また入力電圧 E_1 が30(%)の場合, サイリスタ調光の k_p はスライダック調光に対し約2倍の大きさとなる。したがってサイリスタ調光の方が脈動は大きい。これは前報に報告した電流ひずみ率の変化とよく類似している。図9は照度と光束脈動率の関係をしめしたもので, k_f は図8の k_p とよく対応している。変化の大き

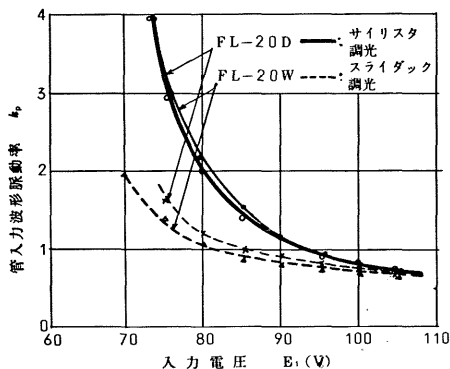


図8 入力電圧と電力波形脈動率の関係

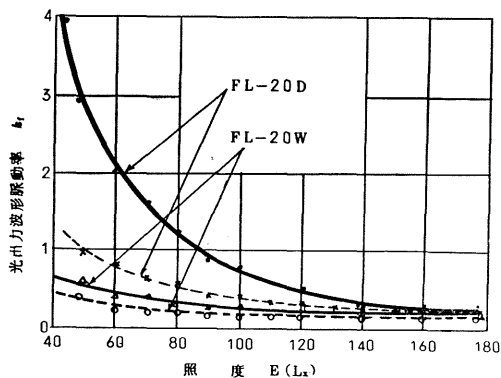


図9 照度と光出力波形脈動率の関係

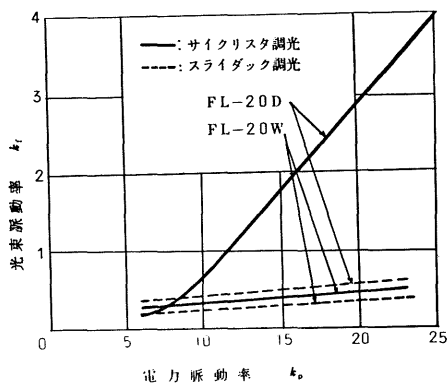


図10 電力脈動率と光束脈動率の関係

さは昼光色, 白色の順でやはりサイリスタ調光の方が脈動率は大きい。特に昼光色の変化が大きいのはいけい光の残光性が少ないものと考えられる。両者の脈動率の関係を具体的にしめすと図10のようになる。図11は調光の場合の電圧, 電流, 電力, 光束等のオシログラムをしめす。(1)は $\alpha=60^\circ$ の場合の電圧, 電流波形, (2)は光束, 電力各波形をしめす。両者の関係は時間的によく対応し, 電流波形の2倍の周波数を多く含んでいるのが認められる。(4), (5), (6)は $\alpha=90^\circ$ の場合の各波形をしめす。(5)の光束波形は白色, (6)は昼光色けい光灯をあらわす。両者を比較すると白色けい光灯の残光による時間おくれが明らかに認められる。(7), (8), (9)はスライダック調光の場合の各波形をしめすものでサイリスタ調光にくらべて両者の波形はなめらかになり, 脈動ははるかに小さい。

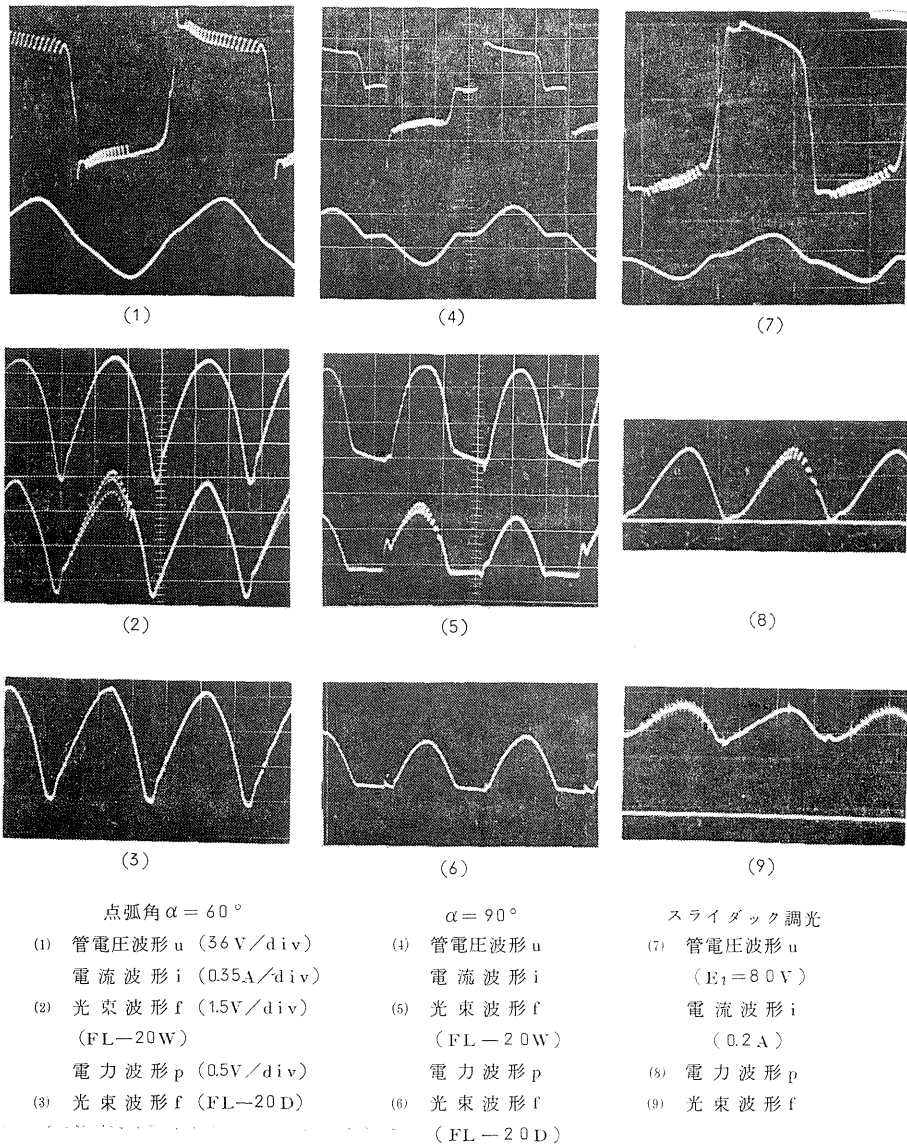


図 11 電流, 管電圧, 電力, 光束波形

3. 安定器鉄心の振動と騒音

けい光放電灯の安定器は一般にチョークコイルや磁気変圧器が多く用いられるが、実際にランプが点灯している場合、これらの鉄心からは耳ざわりな不快な音を発生する。一般に電力用変圧器から発生する振動、騒音は主に電磁力作用や磁気ひずみによる励振に起因するものといわれているが、あきらかな解明はなされていない。^{(6),(7)} けい光灯の安定器鉄心から発生する振動、騒音も電力用変圧器と同様に電磁力や磁気ひずみが大きく原因する

ものと考えられるが, サイリスタ調光の場合は放電灯回路に含まれる高調波の影響により, 安定器鉄心の振動騒音の様子は異なるものと思われる。安定器騒音の周波数分析結果については2, 3の報告^{(8),(9)}がなされているが, これは通常の点灯の場合である。筆者らは20(W)用安定器2個(A, B)を資料(図12-(a))に選び, FL-20WS けい光灯をサイリスタ調光した場合の振動, 騒音について測定検討した。

<3-1> 振動の測定

安定器鉄心の振動は鉄心の位置によって振動波形やその大きさに多少の相違が見られる。全体的に振動の大きい部分はコイルの磁界に対して直角方向より平行方向の方が多い。また振動と音との関係を調べるには, その発音体の振動加速度と, 測定した音との関係を比較するのがよいといわれている⁽¹⁰⁾。実験では安定器鉄心の各位置に対して振動がもっとも大きく, かつ複雑な波形をしている部分(図12-(b))を選んでサイリスタの点弧角に対する相対振動加速度レベルを測定した。

<3-2> 騒音の測定

特定のものから発生する騒音の測定は無音響室で行うのが理想的だが, 実験では幅4.2(m), 奥行6.1(m)高さ2.9(m)の2面ガラス窓, 木造室内で暗騒音に注意して深夜測定を行った。暗騒音と安定器騒音レベルとの差は19.5~20.1(dB)(安定器A, Bおよびサイリスタの点弧角により)である。したがって暗騒音による補正を行わず, 騒音レベルを聴感補正回路AおよびC特性で測定した。さらに1/3オクターブ分析器により周波数分析を行った。

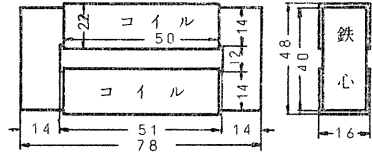
<3-3> 実験の方法

(1) 振動の測定は図12-(b)にしめすように木枠の中に安定器を綿糸で吊し安定器の下部をスポンジで支持し外部から影響を受けないように装置した。振動の測定は検出部ヘッドのチタン酸バリウム製平形アタッチメントを安定器鉄心面に接着し, 検出した出力は増幅器を通して1/3オクターブ分析器により周波数分析を行った。

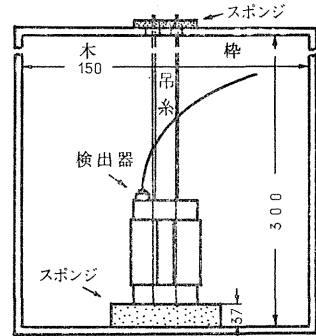
(2) 騒音の測定は前述の木造室内のほぼ中央に図12-(c)にしめすように安定器を吊し, 鉄心表面の中心から35(mm)はなれた空間にコンデンサマイクロホン⁽¹¹⁾を吊した。また騒音レベルは聴感補正回路AおよびC特性により測定し, 1/3オクターブ周波数分析を行った。測定は暗騒音に細心の注意をはらって, 無風状態の深夜(午後12時から翌日3時)を選んで行った。

<3-4> 実験結果および考察

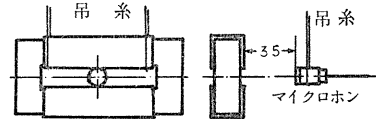
(1) A, B 2つの安定器鉄心の振動周波数の分析結果を図13, 図14にしめす。周波数分布はかなり複雑な応答をしめし, 50(Hz) から10(kHz) 以上にもおよんでいる。特に低



(a) 安定器 (チョクコイル)



(b) 振動の測定装置



(c) 騒音の測定装置

図12 安定器および測定装置

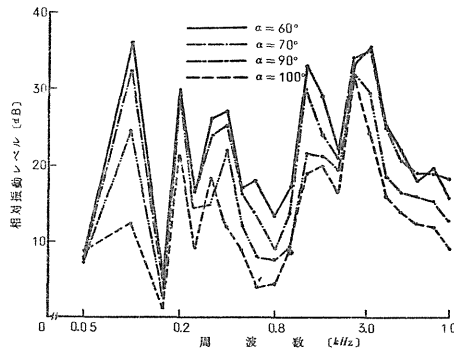


図 13 安定器鉄心(A)の振動加速度

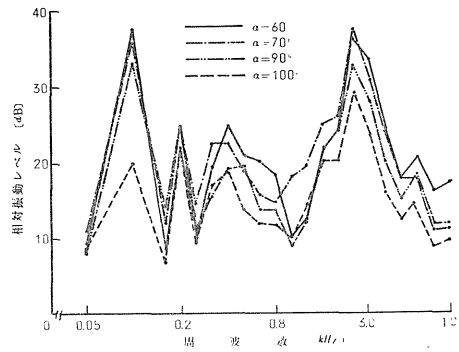


図 14 安定器鉄心(B)の振動加速度

次の周波数レベルは偶数次にくらべて奇数次が著しく小さくあらわれているが、これは鉄心が電力の脈動に対応して振動していることをあらわしている。図13, 図14で振動レベルがもっとも大きい周波数は安定器 A の場合 100(Hz) および 3.15(kHz), B では 100(Hz) と 2.5(kHz) でほぼ同じレベルをしめしている。ここで 100(Hz) は電力の基本周波数であるから振動が大きくあらわれるのは当然と思われる。しかし 3.15(kHz) および 2.5(kHz) の応答がピーク値をしめすのは、その周波数の大きさから考えると安定器鉄心の構造による機械的振動特性の影響と考えられる。さらに周波数の分布状態を観察すると A, B とも 1 (kHz) 付近を境にして2つの周波数帯に分けられる。この2つの周波数帯はサイリスタ点弧角に無関係に存在し、点弧角の変化に対してそれぞれの周波数レベルは減少の傾向にある。全般的に見て鉄心の振動は多くの周波数成分を有し複雑な振動をしていることがわかる。

(2) 安定器騒音の周波数分析結果を図15, 図16にしめす。騒音の周波数分布は50(Hz)

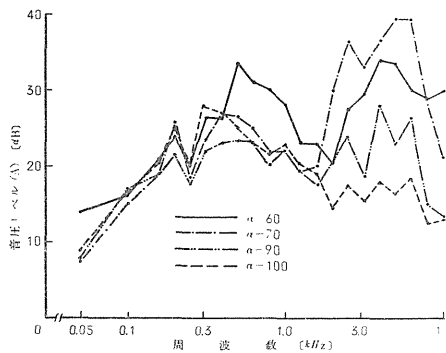


図 15 安定器(A)の騒音

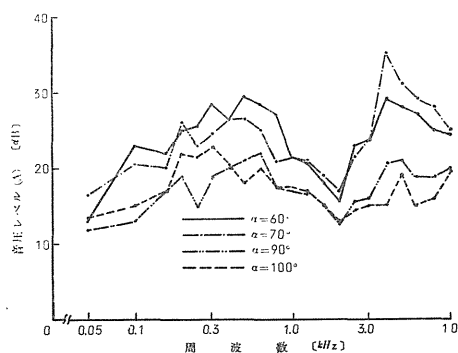


図 16 安定器(B)の騒音

から 10(kHz) におよびやはり複雑な分布をしている。安定器 A, B は 1.5(kHz) 付近を境にしてほぼ 400(Hz) 前後をピークとする周波数帯と、4.5(kHz) 付近をピークとする周波数帯との2つに分けられる。この2つの周波数帯とサイリスタの点弧角との関係について比較すると、安定器 A, B は点弧角が増加するたにしがって両者の周波数帯レベルは小さくなるが、レベル低下の割合は 1(kHz) 以上の周波数の方が大きい。それは B より A

の方が顕著である。騒音は点弧角 $\alpha=60^\circ\sim 100^\circ$ の変化に対して $A=19.8\sim 9.7(\text{dB})$, $B=18.0\sim 9.1(\text{dB})$ である。ここで $\alpha=60^\circ$ より $\alpha=70^\circ$ の場合の方がわずかではあるが, A, B とも騒音は大きく ($\alpha=60^\circ$ では $18.5, 17.3(\text{dB})$, $\alpha=70^\circ$ では $19.8, 18.0(\text{dB})$) それ以後は小さくなる。この現象は $1(\text{kHz})$ 以上の周波数帯レベルによくあらわれている。これは安定器鉄心 A の方により明らかに認められる。騒音周波数の分析結果も振動と同じように複雑で多くの周波数成分をもっている。その分布の状態は振動の分析結果と大体同じ傾向をしめしている。これは聴感補正回路 C 特性で測定した結果と比較すると一層はっきりする。(図17, 図18)

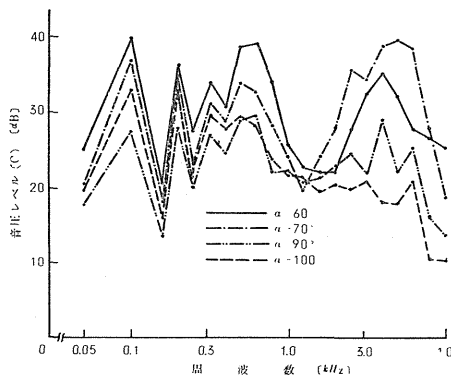


図 17 安定器(A)の騒音分析

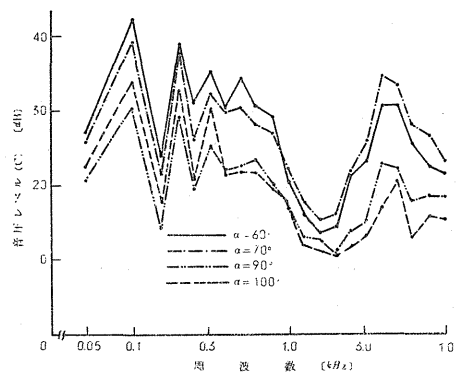


図 18 安定器(B)の騒音分析

(3) 以上 (1) (2) の結果から考察すると安定器の騒音は鉄心の振動によるものであり鉄心表面上でもっとも大きく複雑な振動をしている部分と、騒音との関係はよく近似している。またこの2つの周波数帯を考察するため、安定器の電流、電圧に含まれる高調波(相対値)の分析結果を図19~22にしめす。電流の高調波は $50(\text{Hz})\sim 1(\text{kHz})$ の周波数帯を含み、電圧は電流よりさらに $10(\text{kHz})$ 以上におよんでいる、前述のように変圧器の騒音は主に電磁力作用や磁気ひずみによるものといわれているが、これらのことから騒音(振動)の周波数分布の2つの周波数帯のうち、 $1(\text{kHz})$ 以下は安定器電流の交番磁界に

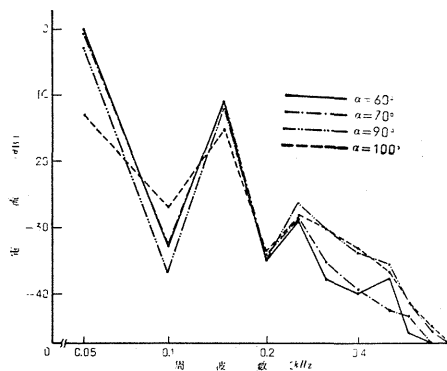


図 19 安定器(A)電流の高調波

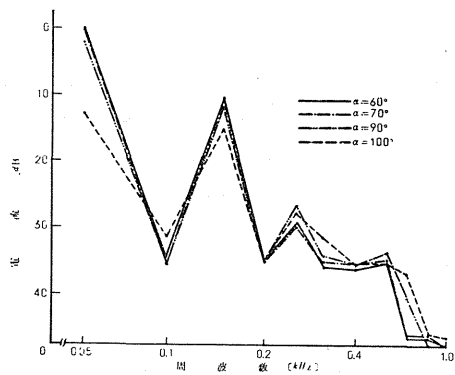


図 20 安定器(B)電流の高調波

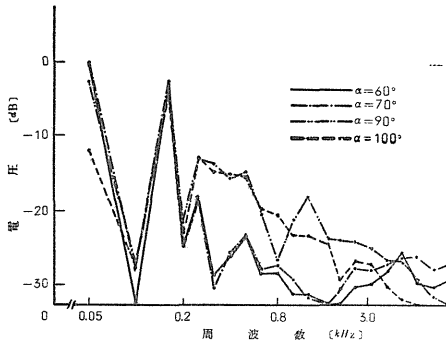


図 21 安定器(A)電圧の高調波

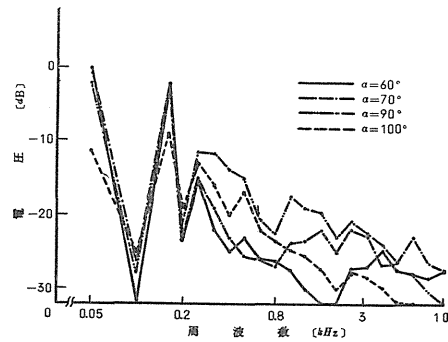


図 22 安定器(B)電圧の高調波

よるものと考えられる。一方 1(kHz) 以上の周波数帯は安定器回路の高次の高調波に対して鉄心の機械的構成が大きく影響しているものと考えられる。この現象をさらに究明するため、安定器鉄心(A, B)単体の周波数一振動特性を測定した結果、入力周波数が 1(kHz) 以下の場合には機械的共振点は少ないが、1(kHz) 以上では多くの共振点があられ、その機械的 Q には高低がある。さらに周波数が 4(kHz) 以上になると共振は緩慢になると考えられる。

4. む す び

サイリスタ調光の場合のけい光放電灯の電力および光束波形の脈動、ならびに安定器騒音に対する高調波の影響について実験考察した結果、つぎのような結論が得られた。

(1) けい光灯の光束脈動は電力脈動に対応して変り、両者の波形から電力一光エネルギー変換が明らかに認められる。

(2) 脈動の大きさはけい光灯の種類、すなわちけい光物質の残光性によって異なり、白色より昼光色の方が大きい。

(3) サイリスタ調光の場合の電力脈動はスライダック調光のそれにくらべて著しく大きく、光束脈動もこれに対応して変るが、残光性の大きいけい光灯(白色)ではあまり変らない。

(4) 安定器鉄心の振動は鉄心表面の位置によって異なり、波形が複雑でかつ振幅が大きくあられるのは、コイル磁界に対して平行方向である。この部分の周波数分析結果は騒音の周波数分析とよく近似している。

(5) 安定器単体の騒音は比較的小さいが、多くの周波数成分を有している。(50(Hz) から 10(kHz) 以上にもおよぶ) 調光した場合の点弧角、 $\alpha=60^\circ \sim 100^\circ$ の変化に対して安定器から 35(mm) はなれた点の騒音は A が 19.8~9.5(ホン)、B は 18.4~9.1(ホン) であった。

(6) 騒音の周波数分布は 1(kHz) 付近を境界にして、2つの周波数帯に分けられる。これは点弧角に無関係に存在する。この中で 1(kHz) 以下の周波数帯は交番磁界、(電磁気作用、磁気ひずみ) 1(kHz) 以上の周波数は鉄心の機械的構造によるものと考えられる。今後さらに光束変換器とアナログ乗算器の精度の検討、ならびに騒音分析について、電磁

力作用と磁気ひずみのいずれかにより多くの影響を受けているか, また鉄心の機械的構造上の影響についても検討したい。おわりに本研究について, 有益な助言をいただいた本学工学部電子工学科岡崎助教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1), (2) 齊藤辰弥 ; 水銀灯の理論と照明, 電気書院 (昭39) 80
- (3) 大島, 小野 ; 茨城大学工学部研究集報 第19巻 (昭46) 72
- (4) たとえば フィルブリック/ネクサス 川瀬太郎訳 ; 演算増幅器応用の手びき (昭46) 173
- (5) 大島, 小野 ; 茨城大学工学部研究集報, 第19巻 (昭46) 75
- (6) 電気学会 : 電気学会技術報告, 第22号 (昭35)
- (7) 土屋, 岡田 : 磁気ひずみと変圧器騒音, 電気学会全国大会 (昭46)
- (8) 吉田, 服部, 谷沢 : けい光灯安定器の騒音について, 電気通信学会, 電気音響研究会資料 (昭41)
- (9) 堀, 横山 : けい光灯安定器の騒音, 電気学会連合大会 (昭44)
- (10) たとえば 安田 : 騒音と騒音防止, オーム社 (昭36) 314, 316