

## 高調波火災に関する一考察

横浜市消防局

計画課・研究開発課・金沢消防署

### 1. はじめに

近年、半導体応用機器などを電流が通る時に高調波と呼ばれる歪んだ電圧の波形が生じ、これに起因したとされる火災が発生している。

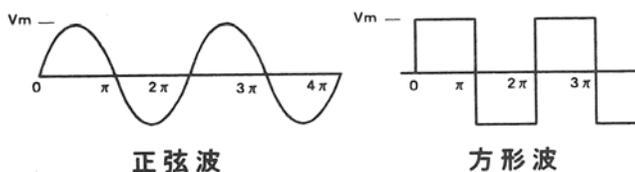
そこで、実験によって高調波による火災の危険性を考察し、高調波に関する安全対策の促進、あるいは今後の再発防止に役立つことを願い、実験の概要と結果について紹介する。

歪波に含まれている基本波の整数倍の周波数の正弦波のことを高調波と呼ぶ。インバーター(周波数変換装置)から発生する方形波を例にとると、方形波は次式の無限級数で表せられる。

$$v = \frac{4}{\pi} V_m \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega t + \dots \right)$$

基本波                  第3高調波                  第5高調波                  第7高調波

$V_m$  : 方形波の振幅



### 2. 高調波とは

私たちが毎日利用している電気は、50HZ、60HZの交流の正弦波(注:実際は少し歪んでいる)であるが、もしこの50HZ(または60HZ)の正弦波(基本波)の波形が歪み、それが50HZ(60HZ)の周期で反復している場合、周波数の異なる(整数倍)正弦波を複数合成すると、その歪波を作ることができる。言いかえると歪波は、複数の周波数の異なる正弦波からできていることになる。この

### 3. 高調波の発生要因

近年、省エネルギー要求の高まりと9制御性能追求の結果として、半導体(サイリスタ、トライアック、パワートランジスタ、GTO)を応用した位相制御、チョップ制御、周波数制御(インバーター)の技術が確立された。これらはいずれも半導体をスイッチングさせ制御するため、非常に急峻なさい断状(電圧上昇率  $dV/dt$  の大きい)の波形に

なり、このような電流には高調波が大量に含まれる。高調波は配線を通ると他の電気機器に高調波障害を及ぼし、さらに配線中に進相コンデンサーが接続されていると、結果的にLC共振回路が形成されたことになり、もしQ(せん鋭度)が1より大きければ高調波はさらに強調されることになる。

#### 4. 高調波の影響を受けやすい電気機器

高調波のうちでも高次高調波は、テレビ・ラジオ等の無線機器、測定機器にラジオノイズとして受信障害や雑音障害を与えるものの、火災の原因に直接結びつかないため省略する。

火災の原因として高調波の影響を受けやすいものとして、変圧器、電動機、リアクトル(チョークコイル)などのコイル類やコンデンサー等が考えられる。

変圧器を例にとると、変圧器には必ず損失があり熱が発生する。この主な損失は銅損と鉄損である。銅損はコイルの銅線がもつ電気抵抗分で発生する損失で、電流の2乗に比例する。鉄損はヒステリシスとうず電流損に分けられ、ヒステリシス損は磁気材料(鉄板等)のもつ残留磁気により発生する損失で、最大磁束密度が一定の場合周波数に比例する。うず電流損は磁束が磁気材料内を通過する時、磁気材料内で発生する電流により生ずる損失で、最大磁束密度が一定の場合、周波数の2乗に比例する。

(注:通常変圧器は磁束密度を最大値近くまで利用している)

したがって、変圧器などのコイル類は銅線が幾重にも高密度に巻かれているため、

熱が蓄積されやすい。

コンデンサーは、変電設備などで進相コンデンサーとして力率改善目的に使用されているが、その性質上周波数と密接な関係があるため高調波の影響があると考えられる。コンデンサー内部には小さいながらも抵抗が存在し、また漏れ電流も若干あるためそれが損失になり、もし発熱が多ければ破裂の可能性もでてくる。

#### 5. 実験概要及び結果

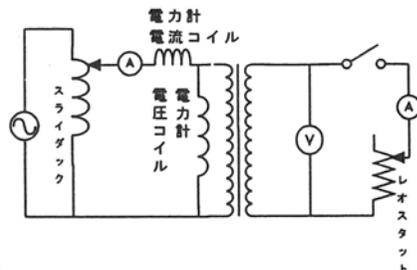
変圧器と進相コンデンサーを用いた実験を各々実施した。

(1) 変圧器の高調波による影響について

ア 変圧器の損失測定

(実験変圧器 100V : 100V 絶縁トランス)  
容量100VA

\* 変圧器総合損失測定回路図



\* 変圧器鉄損測定回路図

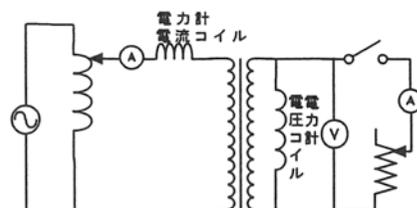
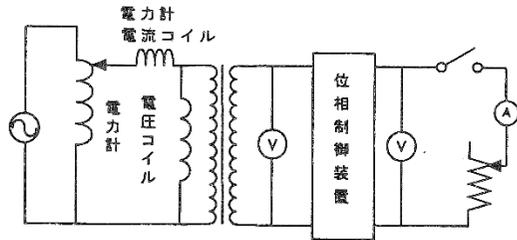


表1 測定結果

	一次電流	鉄損	総合損失
無負荷時変圧器損失	0.1A	3.2W	3.4W
100W負荷時変圧器損失	1.1A	5.6W	8.0W

ウ 2次側を位相制御した時の変圧器損失



イ 位相制御の交流入力時の変圧器損失

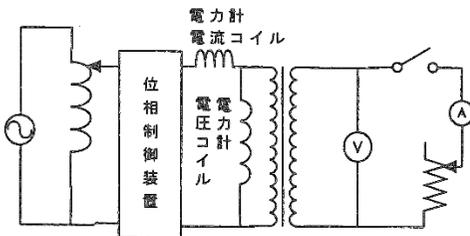


表3 測定結果

導通開始位相角	45°	90°	135°
真の実効値出力電圧	95V	68V	28V
1A負荷時変圧器損失	8W	6W	5W
負荷消費電力	95W	68W	28W

表2 測定結果

導通開始位相角	45°	90°	135°
真の実効値出力電圧	95V	68V	28V
無負荷時変圧器損失	2.5W	1.2W	0.3W
1A負荷時変圧器損失	6W	5W	3W
負荷消費電力	95W	68W	28W

エ 方形波を入力時の変圧器損失

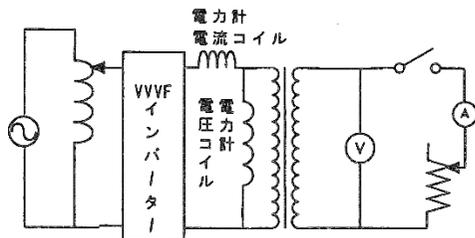


表4 測定結果

周波数	50HZ	80HZ	100HZ
真の実効値出力電圧	100V	150V	100V
無負荷時変圧器損失	4.8W	5W	2.6W
1A負荷時変圧器損失	6W	6W	3W
負荷消費電力	100W	150W	100W

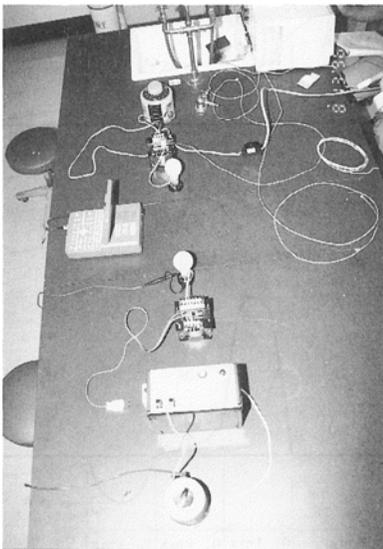


写真1 実験(1)ア  
[正弦波入力と方形波入力時のトランス発熱比較実験]

オ 分析

変圧器に高調波を多量に含む位相制御波を加えても損失は正弦波の損失より少ない(表1,2)。これは高調波による影響よりも鉄心の磁気密度による影響の方が大きいためと考えられる。

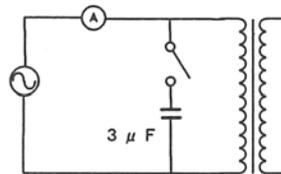
方形波を加えた場合も、無負荷時に若干損失が多い程度で、負荷をかけてもあま

り損失は大きくならず高調波の影響は見られない。(表4)これも高調波の影響よりも鉄心の磁気密度による影響の方が大きいためと考えられる。

(2) 進相コンデンサの高調波による影響について

ア 変圧器の損失測定

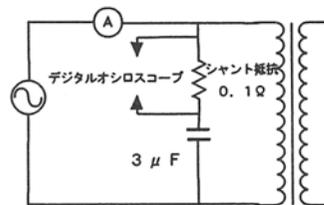
実験変圧器 100V : 100V 絶縁トランス  
容量100VA  
コンデンサ 3  $\mu$ F  
(ペーパーコンデンサ)



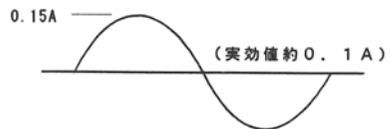
\* 測定結果

	コンデンサなし	コンデンサあり
回路電流	0.1A	0.075A

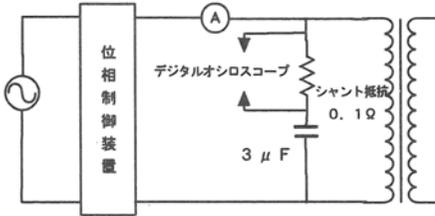
イ 進相コンデンサの電流波形観測



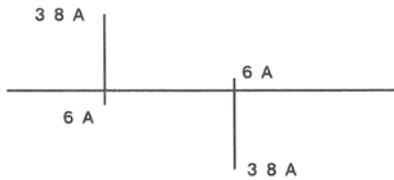
\* 測定結果



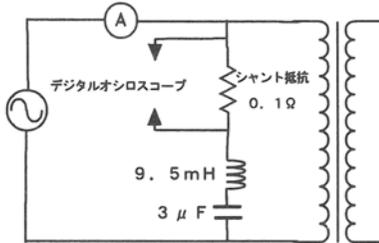
ウ 位相制御 (90°) の交流を入力時の  
進相コンデンサの電流波形観測



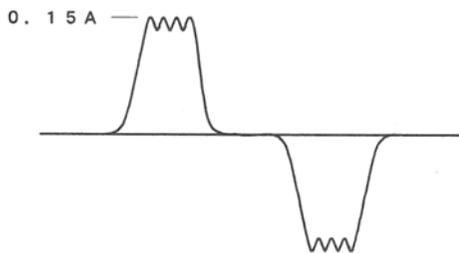
\* 測定結果



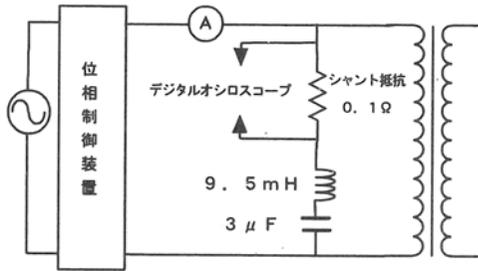
エ 進相コンデンサにリアクトルを入れた  
場合の電流波形観測



\* 測定結果

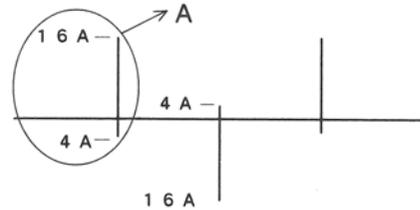


オ 位相制御 (90°) の交流入力時、進相コ  
ンデンサにリアクトルを入れた場合の  
電流波形観測及び温度測定

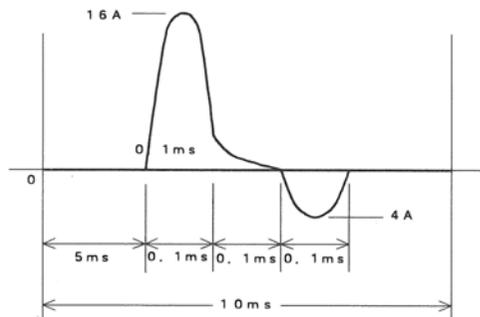


\* 測定結果

[波形]



\* A部分拡大図



[リアクトル・進相コンデンサの温度測  
定]

(前記エ、オの対比温度測定を8ペン  
レコーダーを使用して実施)

当初、進相コンデンサには、2.2μ  
F、500Vと0.47μF、250VのMPコ  
ンデンサを並列にして2.67μFで実験  
していたが、実験開始8分40秒後に

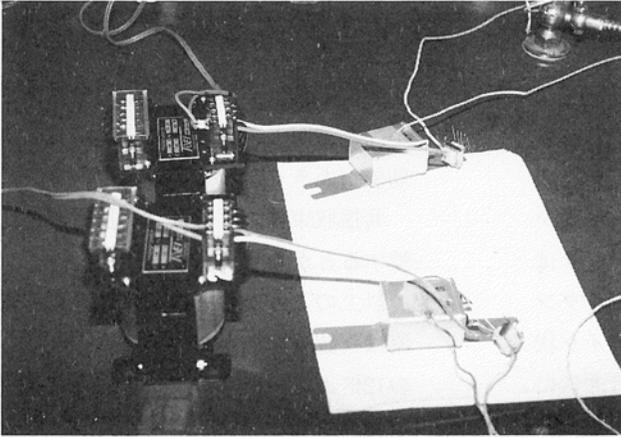


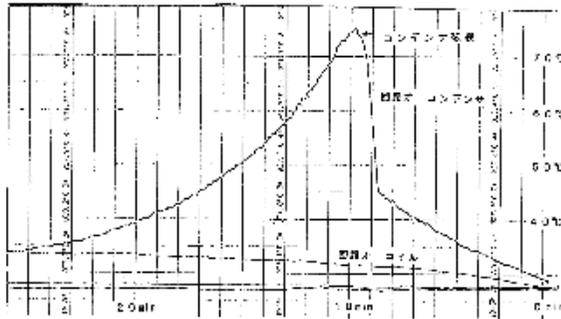
写真2 実験(2)オ  
〔正弦波入力と位相制御波入力時のコンデンサとコイルの発熱〕

0.47 $\mu$ Fのコンデンサが破裂  
(グラフ1)したため、3 $\mu$ F、300V  
のペーパーコンデンサに置き  
換えて実験した。

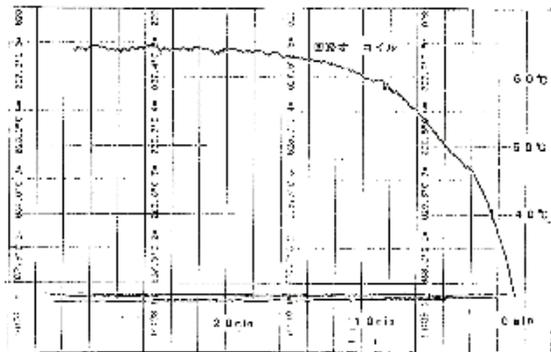
(グラフ2)

なお、コンデンサの破裂原因  
でコンデンサ内部抵抗を測定  
してみると、0.26 $\Omega$ と他に比べ  
高く、また、コンデンサ容器も  
小さいため、共振電流により発  
熱が発生し、加熱されたパラフ  
インが膨張し容器を破ったと  
判明した。

グラフ1



グラフ2 コンデンサを3 $\mu$ Fに交換し、再実験



## カ 分析

変圧器にコンデンサ(進相コンデンサ)を並列に接続すると、無効電流が減少し力率が改善される。しかし、位相制御波のような立ち上がり電圧(dv/dt)の非常に大きい電圧がコンデンサに印加されると、コンデンサは短絡に近い状態(ラインインピーダンスのみ)になり、瞬間的にスパイク状の大電流が流れる。この電流は非常に短時間(0.1ms程度)ではあるが、そのピーク値は38A(電流検出用シャント抵抗0.1Ω時)に達し、正常時0.15Aの253倍になる。このようなスパイク状の大電流は、今回の実験規模なら大して問題とはならないが、出力が大きくなると元の電源の位相制御装置やインバーターなどのサイリスタやトランジスタを破壊してしまう可能性があるばかりか、ノイズは配線を伝わりコンピューターの誤作動などを発生させる可能性もあるため、コイル(リアクトル)をコンデンサに直列に挿入して電流の立ち上がりを抑さえ、電流のピーク値を数分の1にしている。

ところが、今度はコイルを挿入することにより、直列共振回路が形成され、大きな共振電流がコンデンサ及びコイルに流れ発熱がおこる。

$$\begin{aligned} \text{共振電流の真の実効値} &= \sqrt{\frac{\left(\frac{16}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{4}{\sqrt{2}}\right)^2}{\frac{10\text{ms}}{0.1\text{ms}}}} \\ &= \sqrt{\frac{136}{100}} \approx 1.17 \text{ (A)} \end{aligned}$$

この共振電流を真の実効値(直流)に換算する。

共振電流は、非常に短時間ではあるが、電流が大きいため結果的に真の実効値が大きくなってしまっている。

共振収束後の電流は、共振電流と比較するとかなり小さい。(0.07A)以上のことから、コイルに流れる電流は正弦波を加えた時の電流(0.1A)のユ2倍近くになり、コイル自身の損失(発熱)は、その2乗の137倍になる

ことがわかる。

このことは、グラフ2の結果にも顕著に表れている。

## 6. 考察

今回の実験を通じて高調波の影響を直接受けやすいのは、コンデンサとコイルで形成された直列共振回路で、共振大電流によりコイル及びコンデンサ内部に損失が生じ、発熱することがわかった。そして、問題なのは、実験でもわかるように、変圧器を使用していなくても高調波が流入している間は、損失(発熱)が常時発生していることである。対策としては、電流容量の大きなコイルやコンデンサを用いる方法なども考えられるが、はじめから電源の歪みを発生させないことが大切である。

現在、電気製品のほとんどは電圧と電流が直線比例しない負荷であり、これらは波形を歪ませる要因となり、これらのような小さな要因が集まって大きな力となっていることも考えられるため、今後の解明が待たれる。