非直線性誘電体素子の 蛍光灯始動器への応用[†]

小野 吉之*

1. はじめに

近年、非直線性誘電体素子 (Non-Linear Dielectric Element: 以下 NLDE と略す.) を応用した蛍光灯用始動器が構造の簡単さから注目されている。この始動器は、NLDE と半導体スイッチの並列接続からなり、誘導性安定器に適合する。

NLDE は代表的強誘電材料であるチタン酸バリウム: BaTiO_3 を主成分としたセラミクスであるが、単結晶に近い電気特性を示し大きな $D-E$ ヒステリシスを持つ。分極が反転するときの大きな電流変化によって、1 kV 以上 (30 W 安定器の場合) の電圧パルスを発生することができる。

この始動器の基本動作では、1 電源サイクル中に予熱と始動パルスの発生を各 1 回行なっている。この場合に、蛍光管フィラメントが十分に予熱される前から始動パルスが印加されるため、蛍光管の点滅寿命に悪影響を与える。しかし、十分に予熱された後に始動パルスが印加されるような時限動作を行なうことにより、蛍光管の点滅寿命および黒化が著しく改善されることがわかった。

2. NLDE について

2.1 BaTiO_3 の基本格子

BaTiO_3 は代表的な変位形強誘電体である。結晶の基本格子は立方晶系であり、図 1 に示すように立方体の頂点に Ba 原子が、面心に O 原子が位置し、中心に Ti 原子

図 1 BaTiO_3 の基本格子
(ペロブスカイト構造)

図 2 BaTiO_3 の基本格子形状と
自発分極の方向

が位置する。この構造をペロブスカイト構造という。基本格子の形状は温度により変化し 図 2 に示すように低温から、菱面体晶系、斜方晶系、正方晶系となる。そして、Ti 原子が中心からわずかにずれて自発分極をもち、その方向は、それぞれ $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ 方向である。キュリー温度 (120°C) 以上では、自発分極が失われ常誘電体相

図 3 BaTiO_3 の自発分極の温度特性

図 4 BaTiO_3 の誘電率の温度特性

[†] Application of a Non-Linear Dielectric Element to a Fluorescent Lamp Starter

* TDK ㈱ 賛助会員 Yoshiyuki Ono

となる。図 3 に自発分極の大きさの温度特性を、図 4 に誘電率の温度特性を示す。

2.2 NLDE の基本構造

NLDE は、基本的に通常のセラミック・コンデンサと同様の工程で作られ形状もほぼ同一である。セラミック・コンデンサの場合には焼結性を向上させるために、粒界に析出するような焼結助材が微量添加されている。これにより均一な粒径の焼結体が得られ電気特性が安定する。十分に粒径を小さくすれば各結晶体が単一の分極域となり、コンデンサの電極間の縦方向に10以上並ぶ状態になって、コンデンサとしての分極曲線は、大きなヒステリシスは示さなくなる。

しかし、NLDE は単結晶と 同じように電極間の縦方向については単一の分極域となっているので、分極曲線は大きなヒステリシスを示す。このためには分極域の形成において、粒界層の存在が無視できる程度に薄くなくてはならない。このために NLDE は高純度の原料を使用し、分散状態を良くして、工程からの不純物の混入を極力少なくすることによって作成される。

2.3 NLDE の基本特性

NLDE は使用される温度範囲で最適な特性が得られるように、BaTiO₃ 中の Ti 原子を Zr, Sn 原子などで数%置換している。これにより結晶の格子定数が変化し、相転移温度が変わる。この変化は置換量にはほぼ比例することが知られている。Ti 原子を他の原子で数%置換した場合の自発分極の温度特性を 図 5 に示す。また、誘電率の温度特性を 図 6 に示す。キュリー温度付近で誘電率が大きくなっている。

蛍光灯始動器としての応用の場合に重要な評価項目として遮断電流がある。これは安定器のインダクタンスを利用

図 5 自発分極の温度特性 (NLDE)

図 6 誘電率の温度特性 (NLDE)

して、始動パルスが発生する場合におけるパルス発生直前の安定器の電流値をさし、パルス電圧に比例する。NLDE 始動器では、電流遮断は NLDE の分極の反転が終了したときに起こるので、始動器としての遮断電流は NLDE 自体のピーク電流 (NLDE 単体に AC 電圧を印加したときのピーク電流) にほぼ比例する。ピーク電流は印加電圧、印加周波数および次に述べる抗電圧により変化する。ピーク電流の電圧依存性を 図 7 に、温度特性を 図 8 に示す。

図 7 ピーク電流の電圧依存性 (NLDE)

図 8 ピーク電流の温度特性 (NLDE)

図 9 抗電圧の温度特性 (NLDE)

強誘電性の別の特徴である抗電圧は、分極が反転するときの電圧であり、図 9 に示すように温度に対して大きく変化する。NLDE 始動器において 始動パルスを発生する

図 10 パルス電圧の電圧依存性 (NLDE)

ときに安定器に印加される電圧は、電源電圧から NLDE の抗電圧を引いた値にほぼ等しい。図 10 に電源電圧と電圧パルス（遮断電流に比例する。）の関係を示す。NLDE 始動器の場合には、より大きな始動パルスを得るために NLDE にステップ状の電圧が印加されるようになっており、その始動パルス電圧の温度特性を図 11 に示す。

図 11 パルス電圧の温度特性 (NLDE)

2.4 NLDE の特徴

以上に述べたような NLDE の特性を有効に利用するためには、正負の抗電圧以上になる交流電圧を印加しなければならない。それ以外の場合には通常のコンデンサ（数 nF）と同様の動きをする。つまり、強誘電体としての特徴から抗電圧以上の電圧が印加され、分極が反転するたびに一定量の電荷が移動する。その電荷量はおよそ $20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 程度であり、100 mA の電流の 200 μsec に相当する。

蛍光灯始動器への応用は、この一定電荷量だけの電流を NLDE が流すことができる点をスイッチとして利用したものである。この利点として、

- (1) 可動部のない固体スイッチであり長寿命である
- (2) オン状態からオフ状態へのスイッチングが容易
- (3) 半導体スイッチに比べ耐電圧性が格段に高い
- (4) バルク動作をするため信頼性が高い

があり、欠点としては

- (1) 電流容量が小さい
- (2) オン状態のときに電圧降下が大きい
- (3) 強誘電体特有の電歪による動作音が発生することがある。

3. 蛍光灯始動器への NLDE の応用

3.1 パルス発生回路

インダクタンスに大きな電流変化を与えると高電圧パルスが発生する。図 12 の回路においてインダクタンス L に電流 I が流れているときにスイッチを開けると、 L にたくわえられたエネルギーがコンデンサ C に移るので、

図 12 インダクタンスによる高電圧パルス発生回路

$$\frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} C V_p^2$$

$$\therefore V_p = I \sqrt{L/C}$$

となるが、実際は減衰項のためパルス電圧 V_p は上式より小さくなる。

同様に NLDE をスイッチとしても高電圧パルスが発生する。NLDE の場合には任意のときにスイッチングできるのではなく、スイッチが閉じるのは逆方向の抗電圧を超える電圧が NLDE に印加されたときであり、スイッチが開くのは、自発分極の 2 倍の電荷量の電流が流れたときである。このため、大きなパルス電圧を得るために上式からわかるように大きな遮断電流が必要であり、NLDE の電荷量が一定のため、NLDE は短時間でより大きな電流を流さなければならない。これを達成するために電圧変化率の大きなステップ状の電圧を印加すればよいが、商用電源周波数では電圧変化率が小さいので、半導体スイッチを使用するのが適当である。この基本回路は図 13 に示すように NLDE と半導体スイッチが、並列の場合と直列の場合の 2 種類ある。

図 13 NLDE と半導体スイッチによる基本パルス発生回路

(1)図は蛍光灯などの予熱の必要な管の始動に応用されており、(2)図は予熱の不必要な HID ランプなどの始動に応用されている。

3.2 蛍光灯始動器への応用

図13の(1)における動作波形を図 14 に示す。始動器に印加される電圧がゼロから上昇し、NLDE の抗電圧以上になると NLDE は正方向に充電され、その機に SCR が導通し予熱電流が流れるようにする。予熱電流は安定器のインダクタンスのため $1/2\pi$ (rad) 程度位相が遅れ、予熱電流

図 14 NLDE 蛍光灯始動器の動作波形

が減少しゼロになるのは、ほぼ電源電圧が負の最大値をとるときである。そのときに NLDE にステップ電圧が印加され、始動パルスが発生する。このように電源の 1 サイクル中に予熱と始動パルスが蛍光管に印加され、ランプが始動するまで継続する。

NLDE 始動器では、予熱電流は半波整流で行なわれるので実効電流は全波の場合よりも大きくなる。また、SCR に印加される高電圧パルスに対しての耐電圧は、SCR に高耐電圧のダイオードを順方向に直列接続することにより容易に解決できる。

図 15 点灯前後の管電圧波形

図 15 に電源電圧と点灯中の管電圧波形を示す。蛍光管の点灯前に始動器が動作し、点灯中は始動器が動作しないように SCR のゲート回路を設定しなければならない。たとえば、SCR の動作電圧を電源電圧と点灯時管電圧の中間に設定する。

NLDE 始動器の特徴として、SCR の点弧位相により予熱電流とパルス電圧の値が変化する。NLDE は正負の抗電圧以上の電圧を印加しないとその特徴が現われないため、SCR の動作電圧が NLDE の抗電圧以下であると、NLDE に正の抗電圧以上の電圧が印加されないで、高電圧パルスは発生しなくなる。蛍光管始動器の能力は予熱電流と始動パルス電圧が大きいほど良いので、SCR の点弧位相は、始動パルスが発生する範囲内で小さいほど良いことになる。

しかし、蛍光管と安定器との相性により最適な点弧位相を決定する必要がある。特に、低温・低電圧で蛍光管と安定器の組み合わせで始動が遅い場合に、蛍光管は放電を開始できる状態になっているが、先に始動器が動作してしまう場合がある。

3.3 NLDE の電歪音について

NLDE は強誘電体であり電歪現象を示し、NLDE 始動器が高電圧パルスを発生するときに、NLDE は大きなうなり音を発生する。うなり音の周波数は安定器のインダクタンスと NLDE のキャパシタンスから決まり、ほぼ数 kHz 程度である。音を減少させる方法としては、回路的に始動パルスを発生させるときにだけ NLDE を働かせ、始動パルス発生時のうなり音は、NLDE を密閉することにより音圧を下げる方法が最善である。

回路的に NLDE を働かせないためには、交流を印加し

ないようにするか、正負のどちらかの抗電圧以上の電圧を印加しなければ良い。図 16 に示すように半導体スイッチを用いることにより必要時に NLDE を働かせ、それ以外のときは NLDE を働かせないようにできる。

図 16 NLDE の動作制御法

図 17 蛍光灯始動器の実用回路

現在実用化されている回路は、予熱用の SCR を NLDE への電圧印加の制御用に兼用する方式である。図 17 に示すように、SCR をダイオードブリッジで正負の電源電圧に対して別の使い方をしている。この利点は予熱の制御と始動パルス発生を単一のゲート回路の SCR で行なえる点である。

3.4 時限動作形回路

蛍光灯始動器に要求されることは次の点である。

- (1) 蛍光管のフィラメントを予熱する電流を流す。
- (2) フィラメントが熱電子放出をできる状態になったら、高電圧パルスを電極間に印加する。
- (3) 蛍光管が点灯したら始動器の動作を停止する。
- (4) 蛍光管が点灯できない場合にも、始動器は動作を停止したほうが望ましい。

前述した SCR の動作が一定の NLDE 始動器は、常に予熱と始動パルスの発生を行なっている。そのためフィラメントが十分に予熱される前から始動パルスが印加されることになり、始動時間は短い、蛍光管の点滅寿命に悪影響を及ぼすことになった。これを改善したのが時限動作形と呼ばれる方式である。SCR の動作点を変化させることにより十分にフィラメントを予熱した後に初めて始動パルスを発生させ、さらに蛍光管が点灯できない場合は動作を停止することも容易にできる。

図 18 に時限動作形の基本ゲート回路を示す。ゲート・アノード間に接続されるコンデンサの端子電圧が、ゲートが駆動されるたびに上昇し、その結果 SCR の動作電圧が上昇していくことを利用している。これにより SCR の点弧位相が遅れていく。この動作を説明すると、

図 18 時限動作形 NLDE 始動器の基本ゲート回路

(1) 始動開始時は、SCR の動作電圧が NLDE の抗電圧より小さいので高電圧パルスは発生せず、予熱電流は大きい。

(2) (1)の状態から動作電圧が上昇すると、予熱電流が減少していく。その間にフィラメントが十分に予熱される。

(3) 動作電圧が抗電圧を超えると始動パルスの発生を開始し、蛍光管が点灯する。

(4) 蛍光管が点灯できない場合（蛍光管寿命末期など）は、SCR の動作電圧が電源電圧よりも大きくなり SCR は動作を停止する。

このように(3)の状態を当初から継続する場合よりも、時限動作を行なうほうが蛍光管寿命の改善がされ、大きな予熱電流が得られるので低温での始動性が向上する。また、点弧位相が変化するので、どのような安定器と蛍光管の組み合わせにおいても、点灯への最適な点弧位相が得られることになるという利点もある。

図 19 蛍光管の点滅寿命試験

図 20 蛍光管の黒化の比較 (30 W)
(5 min. ON-5 min. OFF×10,000サイクル)

蛍光管の点滅寿命試験の結果を、図 19 と 図 20 に示す（具体的な回路を 図 21 に示す）。このように時限動作形

の NLDE 蛍光灯始動器は、フィラメントのスパッタリングが少なく蛍光管の黒化が少ないため、蛍光管の点滅寿命をグロー管の場合に比較して、画期的に延長することができる。表 1 に各スタータ別の特徴を示す。

図 21 時限動作形回路例

表 1 各スタータ別の特徴

項目	点灯方式	グロースタータ	従来の電子スタータ	NLDE スタータ
1. 点灯スピード		1~10 sec	0.5~1 sec	0.8~1.2 sec
2. 寿命(ON-OFF)				
(1) スタータ		4~5 k 回	200 k 回以上	200 k 回以上
(2) 蛍光管		10~20 k 回	10~20 k 回	30~50 k 回
3. 安全性		(1) 管寿命末期に過大電流が流れ続けバラストが発熱する。また 1~2 kV のパルスを出し続け危険	同 左	3~4 sec 以内に点灯しないときは、管寿命末期と判断し自動的に OFF するので安全
4. 形状		小 型	大 型	トランス類を使用しないので小型化が可能 (HIC 化)
5. 蛍光灯の適用		(1) スタータ、管共寿命が短い。ため、容易に交換できない所（工場やホール、体育館など）には使えない。 また、頻繁に ON-OFF する用途に向かない (2) 点灯スピードが遅いため、トイレ、玄関、階段などには使えない。	(1) グローと NLDE スタータの中間 (2) 速点灯するため、従来白熱電球しか用いられない用途にも適用できる。	(1) スタータ、管共寿命が長くなるためメンテナンスが楽になる。 (2) 同左

4. お わ り に

時限動作形 NLDE 蛍光灯始動器は、瞬時点灯ばかりではなく、蛍光管の点滅による寿命の劣化を最小限にすることができることがわかった。この特徴から小型軽量である特徴とともに、電球形蛍光灯への適用が最適であると考えられる。時限動作形式と蛍光管寿命についての詳細な検討は今後の課題である。

NLDE の他の応用としては、

- (1) HID ランプ用始動器
- (2) 容量形安定器
- (3) 毎サイクル点弧方式

などの検討が行なわれている。

参 考 文 献

- (1) 岡崎 清：セラミック誘電体工学 学献社（昭44）
（受付1985年5月17日）