

# ゲートターンオフサイリスタの誘導加熱電源への適用

## Application of Gate Turn Off Thyristor for Induction Heating Power Source

広島製作所 桧山 護\*<sup>1</sup>  
 技術本部 鶴崎 一也\*<sup>2</sup> 原田 朋広\*<sup>3</sup>  
 川畑 理\*<sup>4</sup> 大沼 均\*<sup>5</sup>

他の熱源に比べ優れた特徴を持つ誘導加熱は、パワーエレクトロニクスの発展とともに、その応用範囲が広がってきた。鉄鋼分野などの大規模な熱処理プロセスへの誘導加熱応用では、高性能・大容量電源のニーズが高い。このたび、大容量半導体素子であるゲートターンオフサイリスタを高周波誘導加熱電源へ適用し、そのゲート回路の高速化を実現し、また、電流インバータ動作時のスイッチング特性を把握した。その結果、5 kHz、10 kHzそれぞれの周波数で4 MW、2 MWと実用化されている電源容量の約2倍の大容量電源が実現できた。

The Application of induction heating is expanding with the developments in power electronics. We have developed a high power inverter for induction heating with GTOs (Gate Turn Off Thyristor). New GTO gate drive circuits were developed for high speed switching applications. The turn-off characteristics of a GTO in a current source inverter were grasped. The power rating is 4 MW at the frequency of 5 kHz, and 2 MW at 10 kHz. Only a few GTOs are used for inverter.

### 1. ま え が き

誘導加熱は、他の熱源と比べて次のような優れた特徴があり、広範な用途に適用可能である。

- (1) 他の加熱方式に比べ、温度制御性が良い。
- (2) 直接加熱であるためエネルギー変換効率が高い。
- (3) 周波数の選定により、必要な深さのみの加熱が可能。
- (4) 加熱雰囲気への制約がない。

昨今のパワーエレクトロニクス技術の発展に伴い、誘導加熱用高周波電源の高性能化、大容量化も進みつつある。高周波電源の進歩は誘導加熱の産業応用分野の拡大につながり、高精度の温度制御を必要とする金属の熱処理、クリーン度が要求される半導体製造分野など広範囲に拡がりつつある。特に薄鋼板、圧延材の熱処理などの鉄鋼分野への誘導加熱の適用は、高精度の温度制御性、加熱部位制御性が得られることから、最も注目されている分野の一つである。鉄鋼分野における誘導加熱の適用では、その処理量が大きいことから、一つの加熱処理プロセスで数 MW から数十 MW の大容量の電力を必要とすることが一般的である。したがって、1台当りの誘導加熱電源の容量をできるだけ大きくして、必要な電源台数の減少、全体の加熱システムの小型化、信頼性向上、が求められている。このたび、大容量電力用半導体素子であるゲートターンオフサイリスタ (Gate Turn Off Thyristor, 以下 GTO と略す) を使用して、周波数 5 kHz で 4 MW、また、10 kHz で 2 MW と実用化されている誘導加熱電源の約 2 倍の容量のめどが得られた。本報では、大容量 GTO の誘導加熱電源への適用について紹介する。

### 2. GTO 式誘導加熱電源

開発した GTO 式誘導加熱電源の外観を図 1 に示す。また、周波数、出力などの仕様諸元を表 1 に示す。周波数 5 kHz、10 kHz で、それぞれ出力 4 MW、2 MW と、この周波数帯では、実用化されている最大電源容量の約 2 倍の容量である。また、インバータ部の各スイッチングアーム当り 2 個の GTO のみで構成している

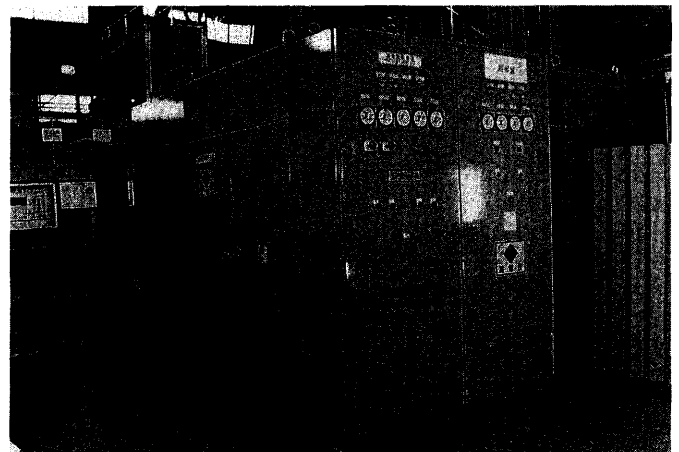


図 1 GTO 式誘導加熱電源 インバータ部に GTO を用いた、5 kHz、4 MW/10 kHz、2 MW 誘導加熱電源の外観を示す。  
GTO type power source for induction heating

表 1 GTO 誘導加熱電源の仕様  
Specification of GTO type power source for induction heating

項目	仕様	
インバータ部素子	GTO	
方式	電流型インバータ	
周波数	5 kHz	10 kHz
出力電圧	2 200 V	2 200 V
出力電力	4 MW	2 MW
素子数	2 素子 × 4 アーム	
外形寸法	W 3 400 × D 1 900 × H 2 400 mm	
重量	約 7 000 kgf	

ため、従来のサイリスタ方式の 1 アーム当り約 10 素子に比べ極めて簡素な回路構成となっている。これにより、信頼性の向上とともに、幅 3 400 × 奥行 1 900 × 高さ 2 400 mm と極めてコンパクトな外形寸法が実現できた。

GTO 式高周波・大容量誘導加熱電源の実現には、次の課題があ

\*1 製鉄機械設計部制御装置課主務

\*4 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター主務

三菱重工技報 Vol. 33 No. 6 (1996-11)

\*2 広島研究所応物・振動研究室

\*5 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター

\*3 広島研究所実験課

った。

- (1) GTO 高周波スイッチング時のサージ電圧抑制のために設けるスナバ回路の、高速動作、及び回路定数の最適化。
- (2) GTO 高周波スイッチングのための高速ゲートドライブ。
- (3) 電流型インバータでの GTO ターンオフ特性の把握。

上記、(1)項については、回路シミュレーションにより、スナバ回路の回路定数の最適化、及び高速動作化を図り、5~10 kHz の高周波スイッチング時における、GTO アノード、カソード間のサージ電圧を最小化できた。

また、(2)、(3)項については、それぞれ、4章、5章に記述する。

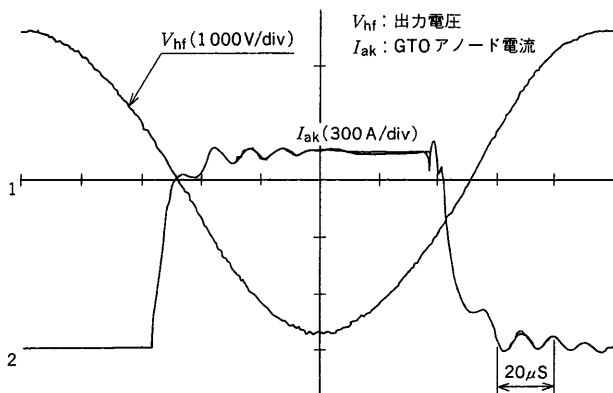


図2 電源出力特性 5 kHz 動作時の GTO 式誘導加熱電源の出力電圧及び GTO アノード電流波形を示す。  
Characteristic of GTO type power source

図2に、GTO 誘導加熱電源運転試験時の電圧・電流波形を示す。周波数 5 kHz、高周波出力電圧 2 000 V、出力電流 1 000 A、出力力率 98 % の高力率で安定な連続出力特性が得られた。図2において、GTO アノード電流波形に含まれる約 100 kHz の周波数成分は、GTO に並列に配置されたスナバ回路に流れる電流である。スナバ回路の動作により、GTO スwitching 時のサージ電圧が十分抑制された出力電圧が得られている。試験では、直流リアクトル、整流部のサイリスタスタック、及びインバータ部の GTO スタックいずれも定常温度に達しており、長期間の連続運転に支障のないことが確認された。なお、本試験では、4 500 V、4 000 A 定格の GTO 1 素子のみで各スイッチングアームを構成している。これをアーム当り 2 素子の構成とすることで 1 素子当りの負担が 1/2 となり、5 kHz、4 MW の出力が可能である。また、GTO のスイッチング特性を 10 kHz まで拡大できたことで、10 kHz、2 MW 出力も可能となった。

### 3. 誘導加熱電源

誘導加熱は、被加熱金属に高周波磁束を作用させることにより、被加熱金属の表面に誘起される渦電流でこれをジュール発熱させ、加熱するものである。渦電流の密度は、被加熱金属の表面で最大であり、内部に向かうに従って指数関数的に減少する。この渦電流の流れる深さを電流浸透深さと呼び、式(1)で定義される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

ここに、

$\delta$ : 電流浸透深さ (m)

$\rho$ : 被加熱金属の抵抗率 ( $\Omega\text{m}$ )

$\omega$ : 高周波磁束の角周波数 (rad/s) =  $2\pi f$

$f$ : 高周波磁束の周波数 (Hz)

$\mu$ : 被加熱金属の透磁率 (H/m)

したがって、被加熱金属の加熱深さに対応した周波数の選定が重要となる。

誘導加熱に必要な高周波磁束発生的手段として、各種の加熱コイルが用いられるが、磁束発生のためのインダクタンスが支配的な回路要素となり、誘導加熱電源からみると極めて力率の悪い負荷回路となる。したがって、加熱コイルに並列、あるいは直列にコンデンサを接続した共振回路を構成し、力率を補償するのが一般的である。図3に示すように、並列共振回路に高周波電力を供給する電流型インバータと、直列共振回路用の電圧型インバータの、大別して2種類のインバータ型式が誘導加熱電源に用いられる。電流型インバータ、電圧型インバータにはそれぞれ長短があるが、数十 kHz までの比較的低い周波数では、保護が容易、スイッチング損失が少ないなどの点で前者の方が有利である。以下に、本報で対象にした電流型インバータの回路特性についてまとめる。

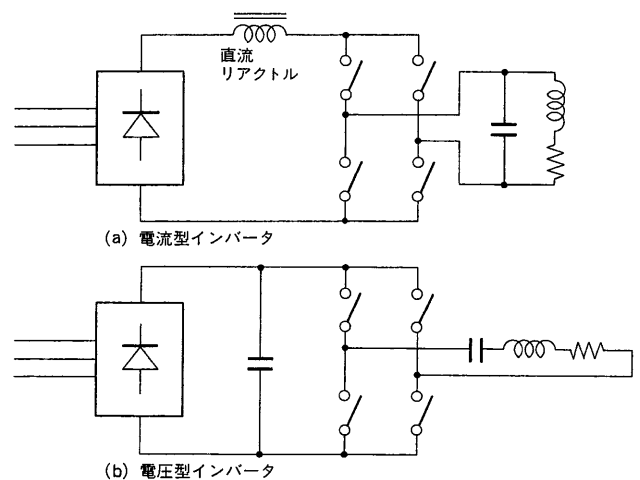


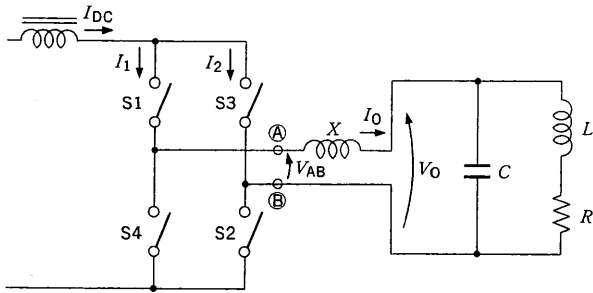
図3 誘導加熱インバータの基本回路 電流型、電圧型の二つの代表的な誘導加熱用インバータの基本回路を示す。  
Basic circuits of two types of inverter for induction heating

誘導加熱電源の高周波電力発生部に用いる電流型インバータは、整流部で作られた直流電力を直流リアクトルによって、常に一定の直流電流出力とし、これを定電流高周波出力とするインバータである。電流型インバータでは、直流リアクトルの定電流特性を維持するため、常に電流を流す必要があり、高周波出力の極性切換え時に、スイッチング素子がすべて同時にオンする期間を設ける。これを転流重なり時間と呼ぶ。

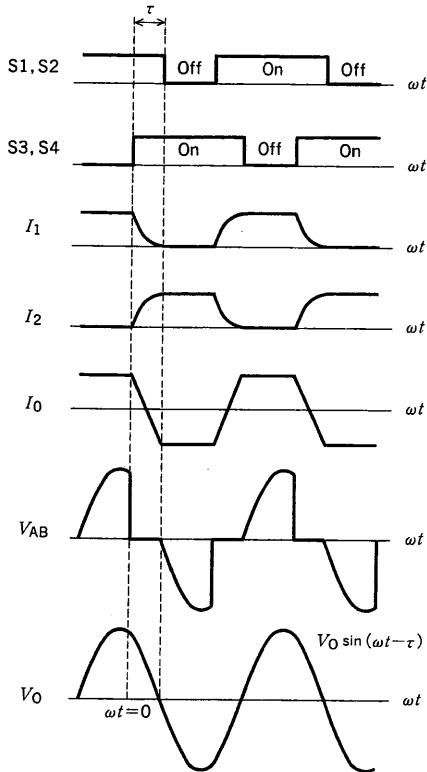
図4に、電流型インバータと負荷回路から成る等価回路と各部波形を示す。図4において、スイッチング素子 S1、S2 の組と S3、S4 の組とで交互に出力を切換えすることで高周波定電流出力が得られる。インダクタンス  $L$ 、コンデンサ  $C$ 、負荷抵抗  $R$  から成る負荷共振回路までの配線に伴うリアクタンス  $X$  が必ず存在し、これを電流切換え時の転流重なり時間を得るために用いる。

図4(a)において、素子 S1、S2 から、素子 S3、S4 への切換え時、すべての素子をオンするため点④-⑤間の電圧はゼロとなる。したがって、共振回路の電圧  $V_0$  を打ち消す方向に同じ電圧がリアクタンス  $X$  に誘起される。

これから、次の三つの式が成立する〔図4(b)参照〕。



(a) 回路構成 (等価回路)



(b) 電圧・電流波形

図4 電流型インバータの回路動作 負荷回路と電流型インバータの回路構成において、インバータ出力電圧と出力電流の関係を示す。  
Explanatory drawing of basic functions of current source type inverter

$$I_1 + I_2 = I_{DC} \quad (2)$$

$$I_{1(t=0+)} = I_{DC} \quad (3)$$

$$-X \cdot \frac{d(I_1 - I_2)}{d(\omega t)} = -\sqrt{2} \cdot V_0 \cdot \sin(\omega t - \tau) \quad (4)$$

ここに、

$I_1, I_2$ : S1, S2 及び S3, S4 の組に流れる電流 (A)

$I_{DC}$ : 定電流直流電流 (A)

$\tau$ :  $V_0$  のゼロ点から切換え開始までの位相差 (rad)

式(2)~(4)を解いて、式(5)を得る。

$$I_0 = I_{DC} - \frac{\sqrt{2} \cdot V_0}{X} (\cos(\omega t - \tau) - \cos \tau) \quad (5)$$

ここに、

$I_0$ : 高周波出力電流 (A)

図4(b)で、 $\omega t = \tau$  のとき、 $I_0 = -I_{DC}$  であるから、式(5)から、スイッチング切換え開始タイミング角  $\tau$  を決定でき、 $\tau$  に相当する転流重なり時間  $\beta$  は式(5)から、以下で得られる。

$$\beta = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left( 1 - \sqrt{2} \cdot \frac{X \cdot I_{DC}}{V_0} \right) \quad (6)$$

すなわち、誘導加熱用電流型インバータでは、図4(b)に示すように、全素子がオンとなって式(5)で減少する電流を、式(6)で減まる転流重なり時間後に、それまでオンであった素子をオフすることで、力率の高い、ゼロ電流でのスイッチングが可能である。

#### 4. GTOのゲートドライブ

GTOは、ゲートに印加する電流の極性によってオンとオフの状態を切換えることのできる自己消弧型電力用半導体素子である。GTOをオン・オフさせるにはゲートに順電流及び逆電流を与える必要がある。直流電流オン・オフ時の電圧・電流波形の例を図5に示す<sup>(1)</sup>。

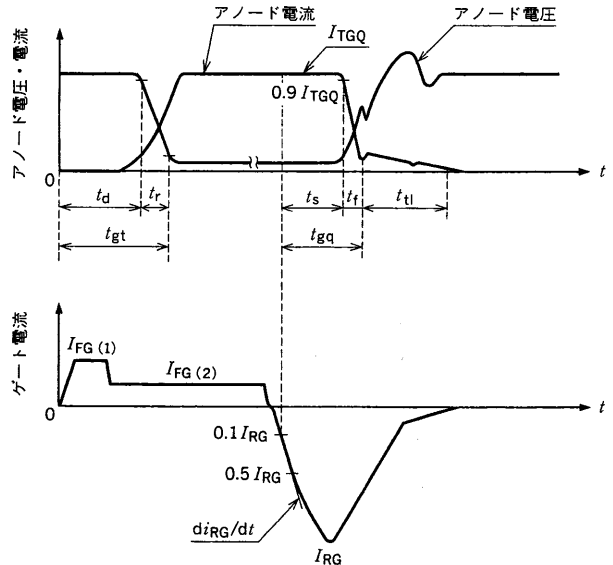


図5 GTOのターンオン・オフ特性 GTOのオン・オフ時のゲート電流と、アノード電圧、電流の関係を示す。  
GTO turn-on and turn-off characteristics

オフ状態のGTOのゲートに速い立上がり率の順電流  $I_{FG(1)}$ 、続いて一定の低電流  $I_{FG(2)}$  が与えられると、遅れ時間  $t_d$  と立上がり時間  $t_r$  の和、すなわちターンオン時間  $t_{gt}$  の後にオン状態となりアノード電流が流れる。また、オン状態のGTOのゲートに、電流立上がり率  $di_{RG}/dt$  の逆電流を与えると、蓄積時間  $t_s$  後にアノード電流が減少を始めると同時にゲート逆電流はピーク値  $I_{RG}$  となる。 $t_s$  と下降時間  $t_f$  との和、すなわちゲート制御ターンオフ時間  $t_{gq}$  の後にアノード電流が極小点まで減少し、さらにテイル時間  $t_{tl}$  の後にアノード電流は保持電流以下となりGTOはオフ状態となる。高周波での使用時、GTOを速くターンオフさせるには、GTO内に蓄積された正孔、電子対の過剰キャリアを素早く外部へ引抜く必要があり、ゲートに急しゅんな立上がりの逆電流を流すことが重要となる。

速い立上がり率のゲート電流を得る方法として、コンデンサに蓄えた電荷をトランジスタなどで直接GTOのゲート回路へ注入するなどのゲートドライブ法が、低電圧の電車駆動用インバータなどで用いられている<sup>(1)</sup>。しかし、トランジスタなどの低電圧半導体素子並びにそのベース駆動回路を、大容量誘導加熱電源で採用する高電圧主回路上のGTOゲート回路に直接接続することは、主回路のスイッチングサージ電圧などでゲートドライブ回路を誤動作させる、あるいは破損する恐れがある。そこで、主回路上のGTOゲートとゲート電流発生回路とを低インダクタンスのゲートドラ

表2 GTO 定格  
GTO ratings

項目	定格	条件
繰返しピーク・オフ電圧	4 500 V	$V_{GK} = -2$ V
非繰返しピーク・オフ電圧	4 500 V	$V_{GK} = -2$ V
DC オフ電圧	2 500 V	$V_{GK} = -2$ V
繰返し可制御オン電流	4 000 A	$V_{DM} = 3 375$ V $T_J = 125^\circ\text{C}$
オン電流実効値	1 880 A	
オン電流平均値	1 200 A	$f = 60$ Hz 正弦波 $T_J = 78^\circ\text{C}$
非繰返しサージ・オン電流	20 kA	60 Hz 半波
電流二乗・時間積	$1.7 \times 10^{10}$ A <sup>2</sup> s	60 Hz 1 波
オン電流最大立上がり率	500 A/ $\mu\text{s}$	$V_D = 3 400$ V $I_{GM} = 40$ A $T_J = 125^\circ\text{C}$
ピークゲート順電圧	10 V	
ピークゲート逆電圧	19 V	
ピークゲート順電流	130 A	
ピークゲート逆電流	1 100 A	

イプトランスで絶縁し、誤動作のない安定で、かつ高速の電流立上がり率を有するゲートドライブ回路を採用・実現した。

### 5. 電流型インバータにおける GTO のターンオフ特性

開発した電流型インバータでは、定格電圧 4 500 V、定格電流 4 000 A の GTO を用いた。表 2 に、使用した GTO の定格諸元を示す。図 6 に、使用した GTO の直流電流遮断時のターンオフ特性と誘導加熱用電流型インバータ動作時の測定値を示す。図 6 で示されるように、一定のゲート逆電流立上がり率のもとでは、遮断するアノード電流が大きいほどターンオフタイムは長くなる。また、ゲート逆電流の立上がり率が小さいほどターンオフタイムは長くなる。これは前述のように、GTO 内に蓄積された正孔、電子対の過剰キャリアをゲート部から引抜くことで GTO をターンオフすることができ、引抜く過剰キャリアが多いほど、また、引抜き速度が小さいほど、これに時間を要することを示す。図のうち直流遮断特性は定電流遮断時のターンオフ特性で、従来から設計データとしてよく用いられてきたものである。誘導加熱用電流型インバータでは、遮断すべき電流は転流動作により蓄積時間中に減少を続ける。この場合、引抜くべき過剰キャリアも蓄積時間中に減少していくことになり、定電流遮断時に比べ、ターンオフタイムが短くなることになる。

図 6 に示す電流型インバータ動作時の測定値は測定負荷条件において、定電流遮断時に比べ約 60 % のターンオフタイムであることが分かる。

ターンオフ動作において、蓄積時間中に GTO アノード・カソード間を通過する電荷量とゲート逆電流によって GTO ゲートから引抜く電荷量との間には相関がある。したがって、出力電流、負荷インピーダンスに応じて定電流インバータ動作のターンオフ開始

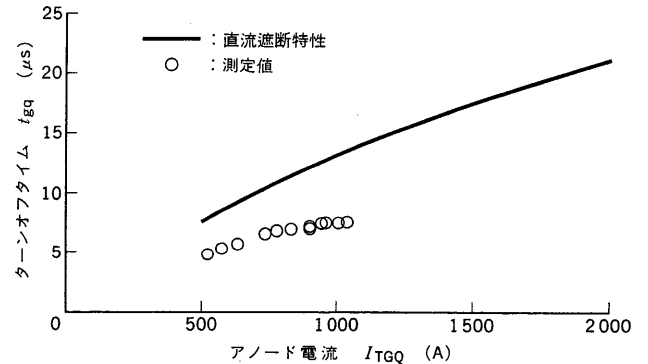


図6 GTO のターンオフ時間 定電流遮断に比べ、約 60 % のターンオフ時間であった。  
GTO turn-off time

表3 GTO 誘導加熱電源の用途  
Uses of GTO type power source

用途	適用例
薄板加熱	薄板合金化炉 薄板焼鈍炉
厚板加熱	熱間鋼全体加熱炉 熱間鋼エッジ加熱装置
溶 解	鑄造用溶解炉
管材加熱	鋼管、特種鋼管焼入れ、 焼戻し、焼なまし
棒材加熱	棒鋼焼入れ、焼なまし
高周波磁界利用	熔融金属制御

時間、すなわちゲート逆電流通電開始時間を設定することで、転流重なり時間が終わるタイミングで GTO をオフ制御できる。

### 6. ま と め

大容量半導体素子である GTO を電流型インバータに適用するに際し、スナバ回路の最適設計とトランス結合高速ゲートドライブ回路の実現により、GTO の安定な高周波ドライブが可能となった。また、電流型インバータ動作時の GTO のターンオフ特性を把握した。これにより、周波数 5 kHz で 4 MW、また、10 kHz で 2 MW と実用化されている電源容量の約 2 倍の容量の誘導加熱電源のめどが得られた。また、使用素子数も従来の数分の 1 と、簡素化された回路構成で、信頼性の高い電源が実現できた。

開発した GTO 式大容量誘導加熱電源の適用例の一部を表 3 に示す。このほかにも多数の適用用途があり、今後、実機への展開を進めていく。

引き続き、本技術をベースに幅広いパワーエレクトロニクスのニーズに対応できるよう開発を続けていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 電気学会編、半導体電力変換回路、オーム社 (1987)