

磁性流体を用いた可変インダクタによる ZVS タンクインバータの ZVS 領域拡大

林 倫瑠* 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Expanding the Zero-Voltage Switching Region of a ZVS Tank Inverter
Using a Variable Inductor with Magnetic Fluid
Michiru Hayashi*, Keisuke Kusaka, (Nagaoka University of Technology)

High-frequency inverters are widely used in induction heating systems and wireless power transfer applications. These systems often experience significant load variations depending on operating conditions, which can lead to hard-switching events and increased switching losses. To address this issue, ZVS tank inverters have proposed maintaining zero-voltage switching over a wide range of load conditions. By designing the tank inductance for the most challenging ZVS conditions, ZVS can be achieved across a broader operating range. However, when the operating point inherently allows ZVS without the tank, the ZVS inductor can introduce unnecessary losses. In this study, a variable-inductance approach is proposed to adjust the ZVS inductor according to the load condition. By switching the inductance based on the operating point, the inverter can expand the ZVS range while minimizing unnecessary losses, thereby maintaining high efficiency under varying load conditions.

キーワード：高周波インバータ，負荷変動，ゼロ電圧スイッチング，可変インダクタ
(High-frequency inverter, Load fluctuation, Zero voltage switching, Variable inductor)

1. 研究背景

誘導加熱用電源⁽¹⁾やワイヤレス電力伝送⁽²⁾ (WPT) などのアプリケーションにおいて、高周波インバータの需要が高まっている。これらの用途では共振特性を有する負荷が接続されることが多く、インバータの高周波動作化は、負荷共振回路における共振用インダクタやコンデンサなどの受動部品の小型化を可能とする。その一方、半導体デバイスで生じるスイッチング損失は周波数に比例するため、高周波動作化によってスイッチング損失が増大する。特に負荷パラメータの変動などにより、半導体デバイスをハードスイッチング条件下で動作する場合、スイッチングデバイスの損失によりデバイスが発熱し、熱設計が困難となる。スイッチング損失を低減するソフトスイッチング技術の一つとして、ZVS(ゼロ電圧スイッチング)がある。ZVS 動作では、デッドタイム期間中にスイッチングデバイスの寄生容量を充放電することで、デバイスのターンオン動作前にドレイン・ソース間電圧をゼロにする。その後、ターンオンすることで、ターンオン時の損失を低減することができる。また、ドレイン・ソース間電圧の電位変動をゆるやかにすることが可能となるため伝導ノイズの低減も達成される。

特に、交流側に共振負荷を有する高周波電源システムで

は、負荷共振を用いたゼロ電圧スイッチング技術が適用されることが多い。しかし、負荷共振形インバータにおいて ZVS を行う場合、負荷電流を用いてスイッチングデバイスの充放電を行うため、負荷インピーダンス変動が発生すると ZVS が達成されない場合がある。特に、高周波インバータが適用される誘導加熱用電源やワイヤレス電力伝送では負荷側の状態や位置ずれによって負荷インピーダンスの変動が発生する。これらの負荷インピーダンス変動により、負荷力率が変動すると ZVS が達成できない領域が生じる問題がある。

この問題を解決するため、ZVS 範囲を拡大することが可能な ZVS タンクを負荷共振形インバータに付与した回路構成が提案されている⁽³⁻⁵⁾。LC 直列回路からなる ZVS タンクをインバータの各レグに接続することで、LC 直列回路には正負の三角波状電流が流通する。これにより、スイッチング時の電荷を引き抜くため ZVS が達成される。

しかしながら、負荷によらず ZVS タンクには一定振幅の電流が流通するため、ZVS タンク内部で常時銅損が生じる。

また、ZVS タンクに通流する電流はスイッチングデバイスを介して供給されるため、スイッチングデバイスの導通損失を増加させる要因にもなる。前述した通り、負荷共振インバータは負荷状態によっては ZVS タンクなしで ZVS を実現可能であることから、これらの動作条件下において ZVS タンクは効率を低下させる原因ともなりうる。軽負荷条件を想定して ZVS タンクを設計した場合でも同様に重負荷条件での動作時に効率を低減させる要因となってしまう。

そこで本研究では、ZVS タンクインバータ内のインダクタに対して、磁性流体を用いた可変インダクタを適用し、負荷インピーダンスの変化に応じてインダクタンスを変化させる。これにより ZVS 範囲を拡大することで高効率な動作を維持する。

2. ZVS タンクインバータ

〈2・1〉 ZVS タンクインバータ 本項において ZVS タンクインバータの動作モードを説明した後、次項においてはその動作モードに基づき ZVS を実現するために必要となる ZVS タンク内のインダクタ LZVS の設計要件を明らかにする。

図 1 に本研究で対象とする ZVS タンクインバータを示す。ZVS タンクインバータの本回路はフルブリッジインバータの各レグにおいて、ローサイドスイッチに並列に LC 回路を追加した構成をとる。この LC 回路を ZVS タンクと呼ぶ。ZVS タンクの C_{ZVS} は入力電圧の半値 $V_{in}/2$ を維持する。各レグのスイッチングによって ZVS インダクタ (L_{ZVS}) には矩形波上の電圧が印加されることで三角波状の電流が流れる。これにより、各レグの ZVS を達成する。

図 2 に ZVS タンクインバータの動作波形を示す。ZVS タンクインバータの動作について 8 つの動作モードに分けて説明する。なお、本図は負荷力率 1 を想定している。

・動作モード 1 S1 のターンオンにより開始する。負荷電流 i_{out} は正の方向に流れている。S2 が OFF のため、S2 に並列接続された LC 回路には直流電圧 V_{in} が印加される。これにより L_{ZVS1} に正の入力電圧の半値が印加され ZVS インダクタの電流は増加する。また S4 は ON のため、S2 に並列接続している LC 回路には電圧は印加されない。そのため、 L_{ZVS2} に負の入力電圧の半値が印加され、ZVS インダクタの電流が減少する。S4 が OFF することでこのモードは終了する。

・動作モード 2 S3 と S4 のデッドタイム期間である。負荷電流 i_{out} は正の方向に流れ続けている。負荷電流 i_{out} と L_{ZVS2} に通流している電流が S3 と S4 のドレイン・ソース間容量の充放電を行う。S3 では寄生容量の放電が行われる。S4 では入力電圧 V_{in} まで寄生容量が充電される。この時、 L_{ZVS2} にかかる電圧極性が変化するため電流が増加し始める。S3 が ON することでこのモードは終了する。

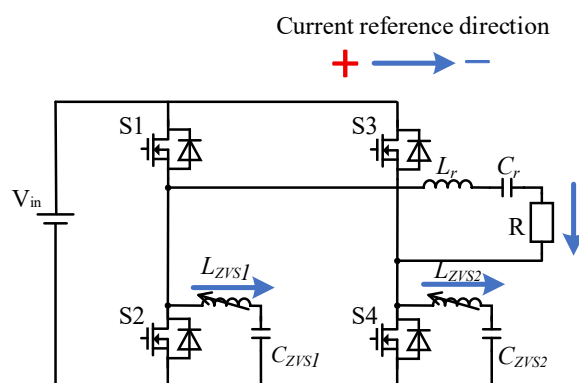


図 1 ZVS タンクインバータ

Fig.1. ZVS tank inverter.

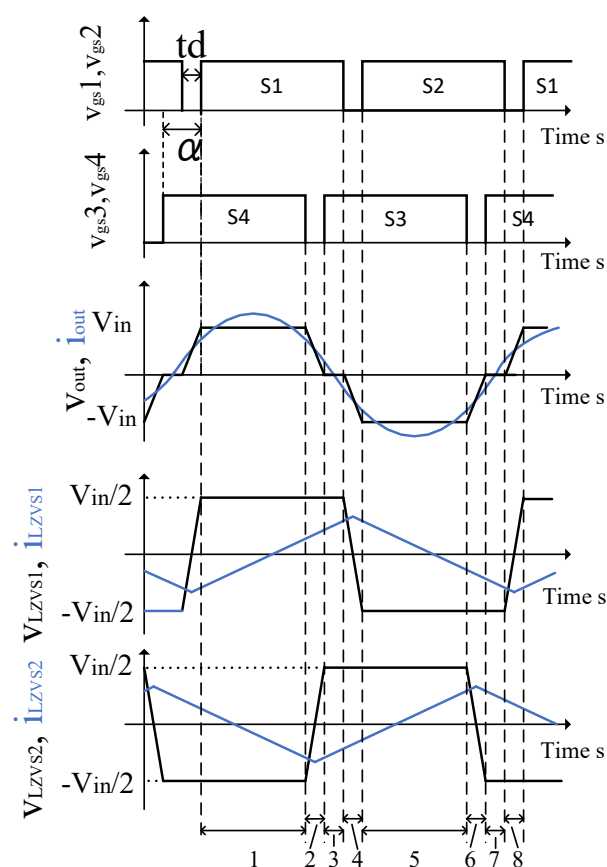


図 2 回路動作波形

Fig. 2. Circuit operation waveform

・動作モード 3 S3 がターンオンすることにより本動作モードが開始する。負荷電流 i_{out} は正の方向に流れ続ける。S4 が OFF のためドレイン・ソース間電圧が印加され続けている。 L_{ZVS1} には正の入力電圧の半値が印加されるため L_{ZVS2} は増加する方向に電流が流れ続ける。S1 が OFF することでこのモードは終了する。

・動作モード 4 S1 と S2 のデッドタイム期間である。負荷

電流 i_{out} は負の方向に流れる。負荷電流と L_{ZVS1} からなる電流を使用して S1 と S2 の充放電が開始される。S1 の寄生容量が入力電圧まで充電が行われる。同時に、S2 は寄生容量の放電が行われる。S2 の電荷が放電完了したところでスイッチングデバイスにかかる電圧が変化する。そのため L_{ZVS1} にかかる電圧極性が変化する電流が減少する向きに切り替わる。S2 が ON することでこのモードは終了する。

・動作モード 5 S2 のターンオンにより開始する。S2 にドレイン・ソース間電圧が印加される。負荷には負の方向に電流が流れつづける。S1 が ON のため L_{ZVS1} は減少方向に電流が流れる。また S4 は OFF のため、 L_{ZVS2} に増加方向の電流が流れる。S3 が OFF する

・動作モード 6 S3 と S4 のデッドタイム期間である。 L_{ZVS2} に通流している電流を使用して S3 と S4 の充放電が開始される。S3 の寄生容量は入力電圧分までの充電が行われる。S4 の寄生容量の放電が行われる。S4 の電荷が放電完了したところで L_{ZVS2} にかかる電圧極性が変化するため電流の向きが減少し始める。S3 が ON することでこのモードは終了する。

・動作モード 7 S2 と S3 が ON となる。S4 が OFF のためドレイン・ソース間電圧が印加されない。そのため L_{ZVS2} の電流は減少方向に流れ続ける。S2 が OFF することでこのモードは終了する。

・動作モード 8 S1 と S2 のデッドタイムが行われる。 L_{ZVS1} から発生する無効電流を使用して S1 と S2 の充放電が開始される。S1 の寄生容量の放電が行われ、S2 の寄生容量は入力電圧 V_m まで充電される。S2 の電荷が充電完了したところで L_{ZVS1} にかかる電圧極性が変化するため電流の向きが切り替わる。S1 が ON することでこのモードは終了する。

以降周期的にこの動作を繰り返す。

〈2・2〉 ZVS タンクインバータの ZVS 領域

ZVS タンクインバータの ZVS 達成原理のイメージを図 3 に示す。ZVS インダクタの値を設計するうえで、デッドタイム期間中にスイッチングデバイスの寄生容量に流れる電荷量を考える⁽⁶⁾。負荷電流 i_{out} と ZVS タンク電流 i_{ZVS} はそれぞれ、

$$i_{out}(t) = I_m \sin\left(\omega t - \phi \pm \frac{\alpha}{2}\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$i_{ZVS}(t) = \begin{cases} \frac{4I_{ZVS_max}}{T}t - I_{ZVS_max} & \left(0 \leq t < \frac{T}{2}\right) \\ -\frac{4I_{ZVS_max}}{T}t + 3I_{ZVS_max} & \left(\frac{T}{2} \leq t < T\right) \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

と表される。ここで ϕ はインバータ出力電圧と負荷電流の位相差、 α は位相シフト角を表している。位相シフト角の正負記号は各レグの位相に対応している。また、二つの電流の和

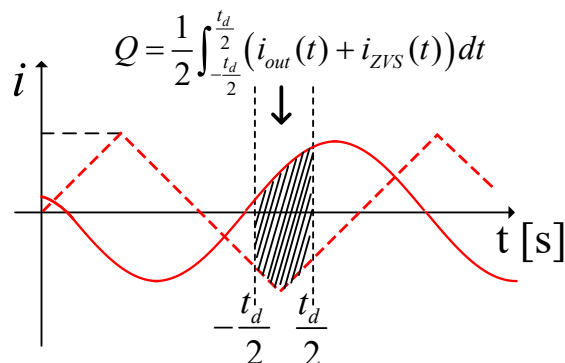


図 3 ZVS 動作時のスイッチングデバイス電流

Fig. 3. Current on switching devices at ZVS operation.

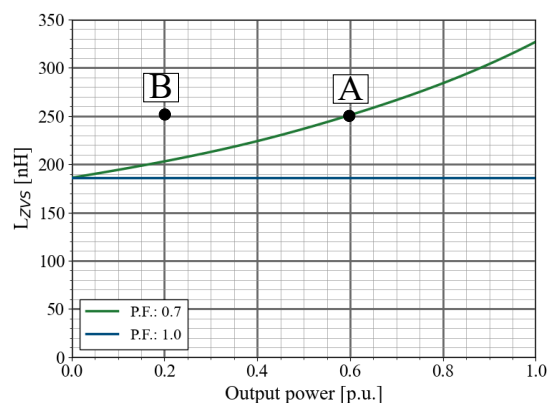


図 4 ZVS タンクインバータの ZVS 範囲

Fig. 4. ZVS range of ZVS tank inverter.

表 1 導出パラメータ

Table 1. Derivation parameters.

Parameters	Symbol	Value
Input voltage	V_{DC}	300V
Phase shift angle	α	0 deg
Operation frequency	f	13.56MHz
Dead-time	t_d	10ns
Drain-source capacitor	C_{ds}	200 pF

がドレイン電流 I_d となる。ドレイン電流 I_d のデッドタイム期間を積分することで電荷量を求めることができるため⁽²⁾、

$$i_d(t) = i_{out}(t) + i_{ZVS}(t) \dots\dots\dots(3)$$

$$Q = -\frac{1}{2} \int_{-\frac{t_d}{2}}^{\frac{t_d}{2}} i_d(t) dt \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を満たすことで ZVS 達成が可能となる。ここで式を展開して L_{ZVS} に流れる電流の最大値は、

$$I_{ZVS_max} = \frac{2Q \mp \frac{2I_m}{\omega} \sin \omega(t_{\alpha} \pm t_{\phi}) \sin \omega \frac{t_d}{2}}{t_d \left(1 - \frac{t_d}{T}\right)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで $t_{\omega/2}$ は位相シフト角を t_{ϕ} は位相差を時間換算したものである。求めた最大電流値から L_{ZVS} を導出する。

$$L_{ZVS} = \frac{V}{4I_{ZVS_max}} \left(\frac{T}{2} - \frac{t_d}{4} \right) \dots\dots\dots (6)$$

この方法により求めた各条件での ZVS インダクタの値を図 4 に示す。この時各パラメータは表 1 に示すとおりである。なお、本図では 1 kW を 1p.u. とした。

本図は、負荷力率毎に ZVS を達成可能なインダクタンス L_{ZVS} を示している。ZVS 条件は負荷力率と負荷電力に依存し、各力率条件において曲線の下側は ZVS が達成される領域、上側は ZVS が達成されない領域となる。曲線上では、各デバイスに通流する ZVS 用の電流が最小振幅となるため、ZVS を達成しつつ導通損失が最小となる。

図 4 上において、例えば負荷力率 0.7 を想定して L_{ZVS} を 250 nH と設計した場合（動作点 A）、負荷電力 0.6p.u. 以上では ZVS が達成可能となる。反対に、A 点から負荷電力が減少し、0.6p.u. 未満となった場合（動作点 B）には、ZVS のための電流が不足することからハードスイッチングとなる。一方、動作点 A から力率が 1.0 まで変動する負荷を想定した場合には、曲線より下の領域であることから ZVS 可能な領域ではあるが、ZVS タンクとスイッチ間に過剰な電流が通流する事となることから、導通損失が増加し、かえってスイッチングデバイスの損失を増加させることとなる。

以上のことから、ZVS タンクインバータにおいては、負荷電力や負荷力率の変化に対して、図 4 中の曲線にそって L_{ZVS} が変化することが望ましいことがわかる。

4. 磁性流体を用いた可変インダクタ

〈4・1〉磁性流体の特性⁽⁷⁾ 図 5 に本研究で用いる磁性流体（フェローテック、TC3030）の磁化特性、表 2 の磁性流体の特性を示す。本磁性流体は油ベース液中に磁性体を分散させた磁性コロイド溶液である。本磁性流体は常温化において液体でありながら、磁化特製を有するという特徴がある。本稿では外部磁場によって磁性流体を物理的に移動させることで、インダクタンスを変化させる。

〈4・2〉磁性流体による可変インダクタ⁽⁸⁾ 図 6 に可変インダクタ構造の概略図を示す。磁性流体を PTFE チューブ内に封入し、外部に巻線を巻く。それぞれの巻線に位相 90° ずつつづらした交流電流を通流させることで進行磁場が発生する。磁性体は磁場勾配に応じて吸着力が大きくなるため、進行磁場方向に向かって磁性流体が移動する。磁性流体は空

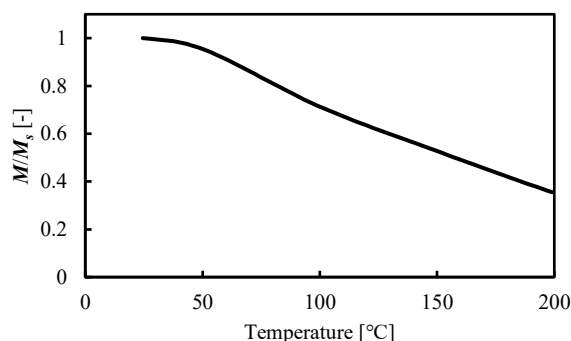


図 5 磁性流体の磁化特性

Fig. 5. Temperature-magnetization characteristics of magnetic fluid.

表 2 磁性流体の特性

Table 2. Physical properties of magnetic fluid.

Properties	Symbol	Value
Dispersion medium		Synthetic hydrocarbons
Saturation magnetic flux density @25°C	B_{sat}	30.0 mT
Fluid density @25°C	ρ	$1170 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Thermal conductivity @22°C	λ	0.143 W/(m・K)
Specific heat	C_p	1420 J/(kg・K)

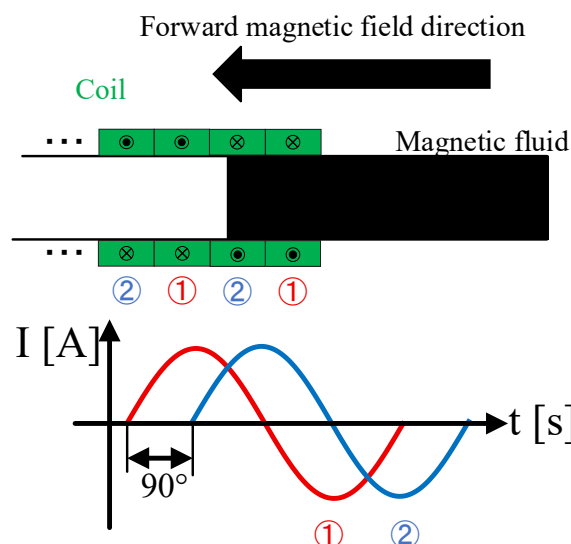


図 6 可変インダクタの構造

Fig. 6. Schematics of Variable inductor and its operation.

気より高い比透磁率を有するため、磁性流体の移動により電磁石用巻線周辺の磁気抵抗が変化しコイルのインダクタンスが変化する。図 7 に作製した可変インダクタの写真を示す。磁性流体を移動させる際には単相 PWM インバータを 2 台使用する。2 つのインバータの電流位相は位相差 90° で電流を通流させる。残りの相は、これらの電流を巻き方向が異なるコイルに通流することで実現する。

〈4・3〉インダクタンス可変範囲 本項では、図 7、図 8 の構造を採用した可変インダクタのインダクタンス可変範囲を実験により検証する。使用した磁性流体用チューブの径は外径 10 mm、内径 9 mm である。図 9 に巻線を巻いた回数が 1, 2, 3, 4, 5 回巻き時の磁性流体の有無によるインダクタンスの変化を示す。図の青色の点が空芯でのインダクタンス、オレンジ色の点が磁性流体をコアとしたときのインダクタンスである。また、棒グラフでは磁性流体をコアとしたインダクタンスに対して空芯でのインダクタンスの比率を示す。図に示すように、空芯状態から磁性流体を挿入することで、インダクタンスを最大約 1.3 倍増加することが可能である。

5. 実機試験

〈5・1〉実験方法 本章では、高周波インバータに対して上述したインダクタを適用し、ZVS タンクのインダクタンス L_{ZVS} を変化させた場合の回路損失を評価する。表 3 に実験パラメータを示す。

図 9 に出力 0.5p.u., $L_{ZVS} = 67$ nH の場合の動作波形を示す。変換損失を確認する上で電力測定ではパワーメータでは周波数帯域が足りていないためオシロスコープの機能から入出力電力を演算し時間平均をとることで各電力を求め損失を計算した。実験条件として重負荷から軽負荷に負荷が変わり ZVS が達成しにくくなることを再現するため各力率で 300 W を 1p.u.として、0.75p.u., 0.5p.u., 0.33p.u., 0.25p.u.の条件で実験を行った。その後、ZVS タンクに磁性流体を用いた可変インダクタを組み込み損失が低減するか確認を行う。

〈5・2〉変換損失 図 10 に L_{ZVS} を変化させた場合の損失を示す。なお負荷力率は 0.9 とした。縦軸が変換損失、横軸が L_{ZVS} のインダクタンス値である。グラフ中において、変換損失の最小点を中央として、低インダクタンス側ではデッドタイム期間中の電流が増大するため、ZVS を達成しやすくなる。反対にインダクタを増加させると、ZVS を達成するために必要な電流が ZVS タンクに通流しないことから損失が増加する。実験結果より、0.75p.u.までは変換損失最小点が 160 nH であるのに対して 0.5p.u.以降は損失最小点が 120 nH となる。負荷が軽くなるほど必要となる ZVS インダクタは小さくなる。ZVS インダクタンスを可変化させることで軽負荷では ZVS しやすく重負荷では損失の低減を可能とする。

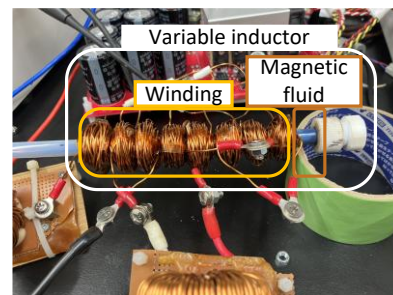


図 7 可変インダクタの実機写真

Fig. 7. Variable inductor with magnetic fluid.

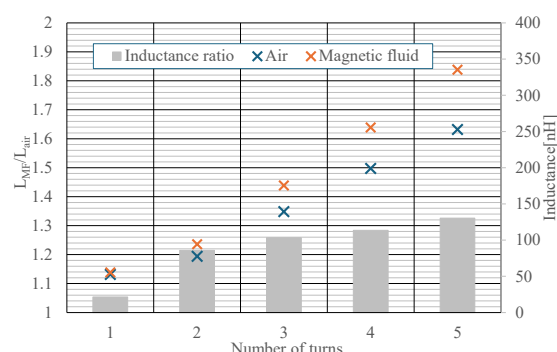


図 8 インダクタンス可変幅

Fig. 8. Variable Inductance Range.

表 3 実験パラメータ

Table 3. Experimental parameters.

Parameters	Symbol	Value
Input voltage	V_{DC}	120V
Phase shift angle	α	0 deg
Operation frequency	f	13.56MHz
Dead-time	t_d	10ns
Resonant capacitor	C_r	36.58pF
Line inductance	L_l	50nH
Capacitance of C_{ZVS}	C_{ZVS1} C_{ZVS2}	310nF

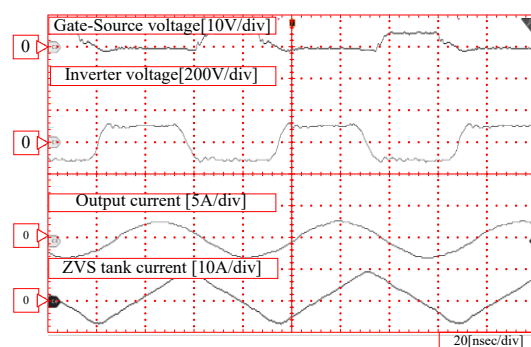


図 9 出力波形(0.5p.u. $L_{ZVS} = 67$ nH)

Fig. 9. Output waveforms (0.5p.u. $L_{ZVS} = 67$ nH).

表 4 可変 ZVS タンクインバータによる発生損失

Table 4. Generated losses due to variable ZVS tank inverter incorporation

	Loss[W]				
	1p.u.	0.75p.u.	0.5p.u.	0.33p.u.	0.25p.u.
High inductance	104.8	73.1	58.0	46.1	34.4
Low inductance	105.3	76.9	56.2	46.5	28.7
Loss reduction rate[%]	0.52	4.94	0.86	0.86	16.7

〈5・3〉可変インダクタの実装

可変インダクタ用に磁性流体をチューブに封入したインダクタを作成した。作成したインダクタのインダクタンスは低インダクタンス時に 93nH、磁性流体を巻線中に挿入した高インダクタンス状態のとき 125 nH である。本インダクタを ZVS タンクインバータに組み込んで実験を行った。表 4 に力率 0.9 において可変インダクタを適用した際の発生損失を示す。表から ZVS インダクタンスを変化させたとき 1 p.u., 0.75 p.u. では高インダクタンスにすることで 0.25 p.u. では低インダクタンスとすることで損失が減少することを確認した。この結果から ZVS インダクタを可変化させることで損失を低減できることを確認した。可変インダクタを適用することで 0.25p.u.において変換損失を 16.6%低減できることを確認した。

5. 結論

本論文では ZVS タンクインバータ内のインダクタに対して、磁性流体を用いた可変インダクタを適用し、負荷インピーダンスの変化に応じてインダクタンスを変化させることで ZVS 範囲を拡大する手法を検討した。ZVS インダクタのコアに磁性流体を用いることで、空芯時のインダクタンス 93 nH に対して、磁性流体を挿入することで約 1.3 倍の 125 nH のインダクタンスを得られることを実験により検証し

た。異インダクタンスが可変できることを想定し、ZVS タンクインバータに可変インダクタを適用した場合の効率改善効果を評価し、変換器損失を最大 16.6%低減可能であることを確認した。

文 献

- (1) Eunsu Jang, Man Jae Kwon, Sang Min Park, Hyo Min Ahn and Byoung Kuk Lee “Analysis and Design of Flexible-Surface Induction-Heating Cooktop With GaN-HEMT-Based Multiple Inverter System”, in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.37, No. 10, OCTOBER (2022)
- (2) Ling Jiang and Daniel Costinett: “A High-Efficiency GaN-Based Single Stage 6.78 MHz Transmitter for Wireless Power Transfer Applications”, in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.8, AUGUST (2019)
- (3) Ryohei Okada, Ryosuke Ota and Nobukazu Hoshi : “Novel Soft-Switching Active-Bridge Converter for Bi-directional Inductive Power Transfer System”, in IEEE Journal of Industry Applications, Vol.11, No.1, pp.97 107 (2021)
- (4) H. Tebianian, Y. Salami, B. Jeyasurya and J. Quaicce, “A 13.56 MHz Full Bridge Class-D ZVS Inverter with Dynamic Dead-Time Control for Wireless Power Transfer Systems” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 2 (2020)
- (5) Yueshi Guan, Yaofu Wen, Yi Cheng, Yijie Wang, Dianguo Xu: “A Novel High-Frequency Inverter with ZVS in Wide Load Range”, in IEEE 7th international Electrical and Energy Conference pp.4657-2662 (2024)
- (6) 山口正通, 渡辺大貴, 日下佳祐, 伊東淳一: 「MHz 帯 kW 級連続運転を実現するインバータ実装法」, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.5, pp.399-499 (2023)
- (7) Masataka Anazawa, Masato Suzuki, Masaaki Baba, Keisuke Kusaka, “Self-Driven Magnetic Fluid Cooling for Power Devices Utilizing Permanent Magnet” in 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS (ICRERA), pp. n.a., No. 253. (2025)
- (8) Leidong Mao, Shihab Elborai, Xiaowei He, Markus Zahn, and Hur Koser, “Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under traveling magnetic fields” in PHYSICAL REVIEW B, Vol.84, No. n.a., pp. n.a. (2011)

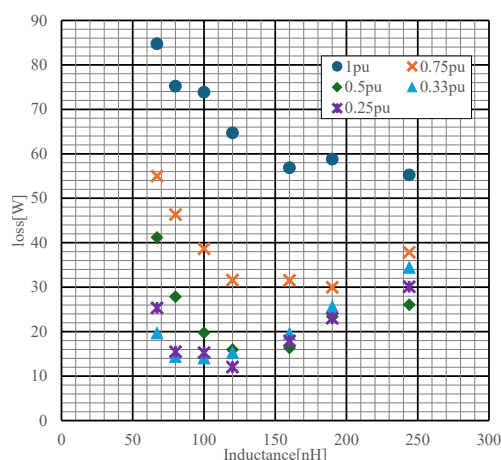


図 10 変換損失

Fig. 10. Conversion loss with changing inductor in ZVS tank.