

低圧大電流高周波トランスに向けた コア直接水冷方式の基礎検討

米富 律騎* 日下 佳祐（長岡技術科学大学）

Fundamental Study on a Core Direct Water-Cooling Method for Low-Voltage High-Current High-Frequency Transformers

Ritsuki Yonetomi*, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

This paper presents a fundamental study of a core direct water-cooled high-frequency transformer for high-current power supplies in hydrogen production. A cooling structure with water channels inside the core is proposed to suppress temperature rise without increasing the winding length. The cooling-channel volume ratio was varied from 0 to 5%, and its magnetic and thermal effects were evaluated using FEM analysis. The results show that the proposed structure has little effect on magnetic flux density and iron loss, while the maximum temperature is effectively reduced. In particular, a cooling-channel volume ratio of around 1% was found to be effective.

キーワード：高周波トランス，大電流電源，FEM 解析，水素製造

Keywords: High-frequency transformer, High-current power supply, FEM analysis, Hydrogen production

1. はじめに

近年，カーボンニュートラル社会の実現に向けて，再生可能エネルギーを用いた水素製造が注目されている⁽¹⁾。水電解装置用電源には大電力化および高電力密度化が求められており，電源内で大きな体積を占めている高周波トランスの小型化の要求がある。これらの二次側到大電流が通流する高周波トランスでは，二次巻線がブスバーで構成されることから冷却の必要性が低い反面，鉄損に起因したコアの発熱が小型化への妨げとなる。

高周波トランスのコア冷却手法として，コア間に冷却板を挿入する構造が報告されている⁽²⁾。しかし，この構造ではコア体積や巻線長が増加する。そこで本研究では，コア内部に冷却流路を設ける直接水冷構造を検討し，FEM 解析により磁束密度分布，鉄損および温度分布への影響を評価する。

2. 設計要件

〈2・1〉回路仕様 Fig. 1 に，本研究で対象とする回路構成を示す。また，設計対象とする 1 ユニット分の高周波トランスの主な仕様を Table 1 に示す。本研究では，水電解装置などの大電流負荷への適用を想定し，1000 A 出力ユニットを並列接続するものとする。これらのトランスでは巻

線がブスバーで構成されることから，伝熱による放熱が期待でき巻線側の冷却は不要である。一方で，コア内で生じる鉄損に起因した発熱がコアの小型化の妨げとなる。

各ユニットでは，直流入力電圧 V_c をフルブリッジイン

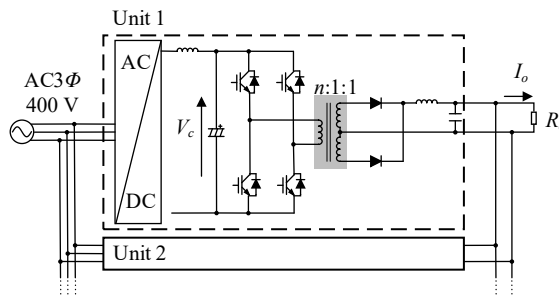


Fig. 1. Circuit configuration for a power supply used in hydrogen production.

Table 1. Circuit parameters.

Parameters	Symbol	Value
Inverter input voltage	V_c	700 V
Output Current	I_o	1000 A
Output resistance	R_o	233 mΩ
Frequency	f	10 kHz
Core material	-	10JNEX900
Winding ratio	n	3

パータにより高周波交流へ変換し、巻数比 $n:1:1$ の高周波トランスを介して二次側へ電力を伝送する。二次側では、整流回路および出力フィルタにより直流出力を得る。

〈2・2〉冷却構造 大電流用途の高周波トランスでは、銅損および鉄損に起因する発熱が問題となる。そこで本研究では、コア内部に冷却流路を設け、パイプ内に冷却水を流す直接水冷構造を検討する。本構造では、Fig. 2 のようにコアに穴を設けてアルミパイプを挿入し、コアで発生した熱を冷却水へ直接伝達する。

冷却流路の影響を評価するため、冷却路体積割合をコア全体体積の 0～5% の範囲で変化させた。ここで、0% は冷却流路を設けない基準モデルである。本解析では、恒温循環装置による水冷を想定し、冷却流路壁面を 20 °C 一定とした。各ケースの最大温度を比較し、冷却路体積割合が冷却性能に与える影響を評価する。

3. シミュレーション結果

〈3・1〉磁束密度 提案する冷却構造では、コア内部に冷却流路を設けるため、冷却路体積の増加に伴いコアの有効断面積が減少する。そのため、冷却路の体積割合が大きくなると、局所的な磁束が集中し、鉄損が増加する可能性がある。そこで、冷却路体積がコア体積に占める割合を変化させ、磁束密度分布および鉄損への影響を評価した。

Fig. 3 に冷却路体積割合における磁束密度分布を示す。冷却路体積割合を増加させた場合において、コア全体の磁束分布に大きな変化は確認されなかったが、有効断面積の減少したため、最大約 0.1% の磁束密度の増加が見られた。

Fig. 4 に冷却路の体積割合における渦電流損失の波形を示す。冷却路を設けない場合の損失を 1 p.u. とすると、冷却路

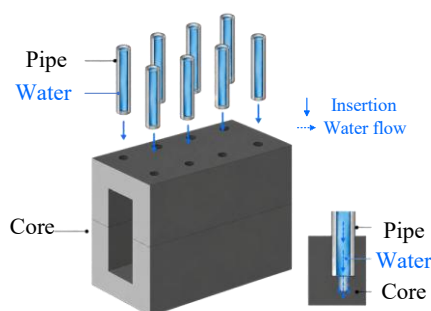


Fig. 2. Proposed structure.

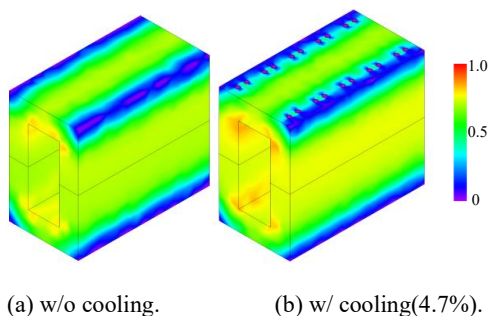


Fig. 3. Magnetic flux density distribution.

体積割合の増加に伴い損失は増加した。これは、冷却路によりコアの有効断面積が減少し、磁束密度が増加したためと考えられる。一方、冷却路体積割合が 5% 程度の場合でも損失増加は約 5% であり、影響は小さいことが確認された。

〈3・2〉熱解析結果 Fig. 5 に、冷却路体積割合に対する最大温度を示す。この結果を見ると、1%を超えると温度低下は緩やかとなり、冷却性能の向上は小さくなる。本研究で使用される 10JNEX900 は 100 °C で磁気特性が低下する³⁾。本結果より 1% 前後が有効な設計条件である。

今後は、冷却路体積割合 1% 前後の構造を中心に、パイプ径および本数の最適化を行う。また、コア加工性や磁気特性への影響を考慮し、冷却性能と構造成立性を両立できる冷却流路を検討する。さらに、試作機を用いた温度上昇試験により、解析結果の妥当性を確認する予定である。

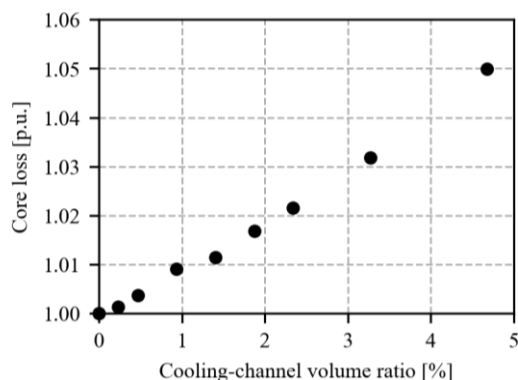


Fig. 4. Eddy current loss in the core.

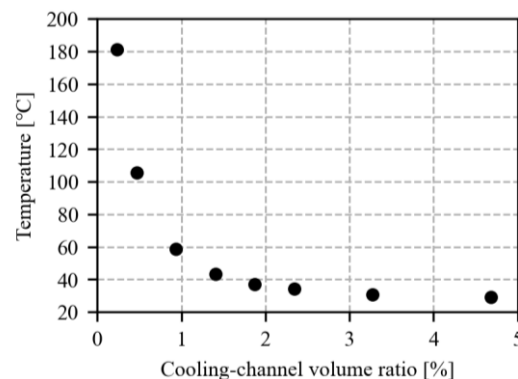


Fig. 5. Maximum core temperature.

文 献

- (1) 中村 勇太、青木 睦、需給調整市場に参入する複数の水電解装置システム、電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌)、2025, 145 巻, 2 号, p. 196-202.
- (2) M. Leibl, G. Ortiz and J. W. Kolar, "Design and Experimental Analysis of a Medium-Frequency Transformer for Solid-State Transformer Applications," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 110-123, March 2017.
- (3) J. Ou, Y. Liu, P. Breining, T. Gietzelt, T. Wunsch and M. Doppelbauer, "Experimental Characterization and Feasibility Study on High Mechanical Strength Electrical Steels for High-Speed Motors Application," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 284-293, Jan.-Feb. 2021