

電界集中部のみに樹脂モールドを適用した SST 用高周波トランスの実機検証

米富 律騎* 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of a High-Frequency Transformer for SST
with Plastic Molding Applying to Only the Electric Field Concentration Area
Ritsuki Yonetomi*, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

This paper reports on the experimental verification of a high-frequency molded transformer for solid-state transformers (SSTs). The high-frequency transformer in DC/DC converters for SST require high-voltage isolation between the primary and secondary windings. In this paper, the rise in temperature of the winding, which becomes a problem when a molded transformer with high insulation reliability is operated at high frequency, is suppressed by using a structure that can be cooled. The experimental results show that the rise in temperature of the windings is suppressed. In addition, the partial discharge test of the transformers shows the developed transformer has sufficient withstand voltage for SST with 6.6-kV input.

キーワード：Solid-State Transformer, 高周波トランス, モールドトランス, DC/DC コンバータ, 部分放電
(Solid-State Transformer, high-frequency transformer, molded transformer, DC/DC converter, partial discharge)

1. はじめに

近年, Solid-State Transformer (以下, SST) が直流スマートグリッドにおける受電トランスや, 超急速電気自動車充電器における商用周波数トランスの代替として注目されている。SST は, 中・高周波でトランスを動作させることでトランスの小型化が実現できるだけでなく, 電圧調整, 無効電力補償機能等, 従来商用周波数トランスでは実現できない機能を付与することが可能である⁽¹⁻³⁾。

SST 向けトポロジーとして, 複数セルの入力側を直列・出力側を並列接続 (以下, ISOP 接続) のマルチセル方式が提案されている。各セルには中・高周波で動作するトランスを内蔵した絶縁型の DC/DC コンバータが接続されており, この DC/DC コンバータは入力側出力間の絶縁と電圧変換により負荷へ任意の電圧を供給するため重要な役割を担っている⁽⁴⁾。ISOP 接続ではこの中・高周波トランスの一次側及び二次側に印加される電圧を低減可能であることから小型化できる。しかし, 6.6 kV 系統での実用を考えた場合, 一次側巻線と二次側巻線間には最大で 6.6 kV が印加されることから, 一次側巻線と二次側巻線間に高い絶縁性能が要求される⁽⁵⁾。

高電圧が印加されるトランスの長期的な絶縁性能低下の原因の一つとして部分放電がある。高電圧が印加される巻線間等に設置される絶縁材中において, ボイドと呼ばれる

微小欠陥がある場合, このボイドを介して微小な電荷の移動により部分放電が発生する⁽⁶⁾。部分放電はトランスの絶縁材料の劣化を招き, 絶縁寿命を縮めることで早期故障の原因となる⁽⁷⁻⁹⁾。高電圧機器の絶縁信頼性向上のために部分放電試験が用いられている⁽¹⁰⁾。部分放電試験は絶縁物に高電圧をかけた際の微小な電荷を検出することで, 絶縁材料の劣化のリスクを推定することが可能である⁽¹¹⁻¹²⁾。

絶縁信頼性が高いトランスとして樹脂モールドトランスがある。モールド材は難燃性の物質を用いるため安全性が高く, 油入トランス等の通常のトランスより絶縁性能が高いため小型・軽量化が可能であることに加え, メンテナンスが不要である⁽¹³⁾。しかし, 高周波におけるモールドトランスの適用を考えた際, 近接効果により交流抵抗が増加し, 銅損が大きくなることから巻線温度が上昇する。これによりトランスには高い冷却性能が必要となるが, 通常のモールドトランスでは巻線周囲を樹脂でモールドしているため巻線自体の冷却することができない。

そこで本論文では放電が予想される電界集中部のみに樹脂モールドを行うことにより高周波トランスの絶縁性能を向上しつつ巻線の冷却可能なモールド構造を提案する。実機による試験を行い, トランスの巻線温度の上昇を抑制可能であることを示す。また, 部分放電試験により, 耐圧の観点からも 6.6 kV 系統に接続する SST 用トランスとして要求される耐圧を示すことができたので報告する。

2. SST 用高周波トランスの設計

<2-1> 回路設計

Fig. 1 に本稿で設計するトランスの適用先となる SST 全体回路を示す。6.6 kV 系統への接続を想定した ISOP 接続の回路であり、1 相あたり 9 セルの計 27 セルで構成されることを想定する。セル内の DC/DC コンバータはトランスの前段で直列共振させるため電流共振型の絶縁コンバータであり、トランスに通流する電流はほぼ正弦波状となる。

本稿では検討回路内の電流共振型 DC/DC コンバータを Fig. 2 のように 1 セルのみで駆動させ、開発したトランスの評価を行う。また、トランスに使用するコアはフェライトを使用し、高周波の観点から PC40 (TDK) 材の UU80×150×30N を 16 個使用した。

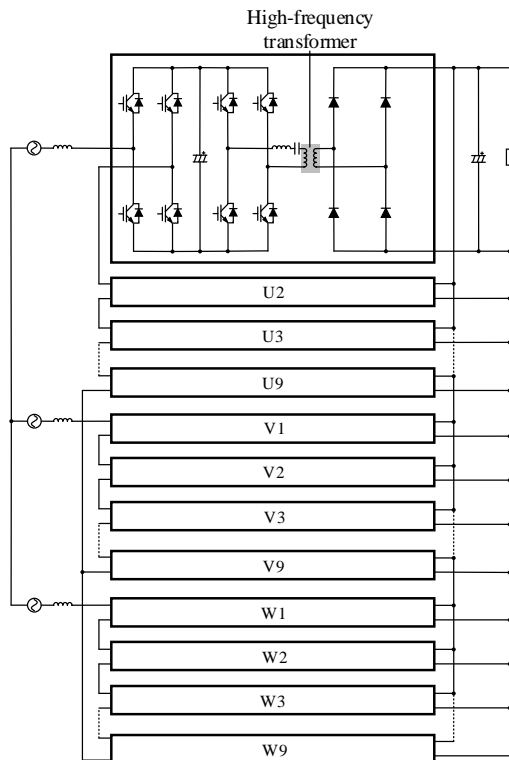


Fig. 1. ISOP connection assuming 6.6 kV system.

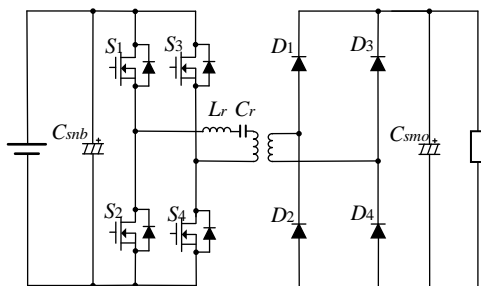


Fig. 2. Current resonant DC/DC converter.

<2-2> 提案するトランス構造

高周波トランスの絶縁距離については明確な規定がないため、類似の規格を参考に絶縁距離を決定した。空間距離を決定する際、IEC61800-5-1 及び IEC60664-1 に基づいて決定した。本規格により絶縁距離 60.0 mm となり⁽¹⁴⁾、マージンを取り 70 mm にて設計を行った。

通常のモールドトランスは Fig. 3 のように巻線が樹脂に覆われている。そのため、高周波化に伴う交流抵抗が増加した際に、巻線の温度上昇が発生する。そこで本研究では、放電が予想される一次側巻線—二次側巻線間及び、巻線—コア間の電界集中部⁽¹⁵⁻¹⁶⁾のみに樹脂モールドを施す。本構造を実現するため、Fig. 4 に示すボビンを作成した。ボビンの作成方法については、Fig. 5 に示しており、手順としては(a) 電界集中部が空洞となるボビンを(b) 3D プリンターにて耐熱性の高い ABS 材を用いて生成する。(c) 生成したボビンの空洞部分にモールド材となるウレタン材(UF-110-1A, UF-110B 配合)に樹脂を流し込んだのちに(d) 真空下で脱泡する。その後、本材料の硬化条件である 85℃以上の恒温槽で樹脂を加熱し硬化させることによりボビンモールドのトランスを作成する。完成したトランスを Fig. 6 に示す。



Fig. 3. Normal molded transformer.

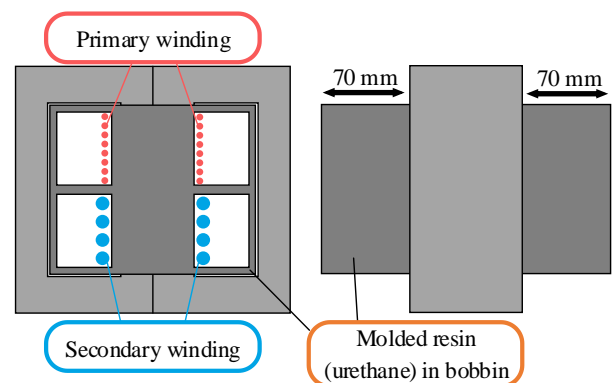


Fig. 4. Proposed transformer insulation structure.

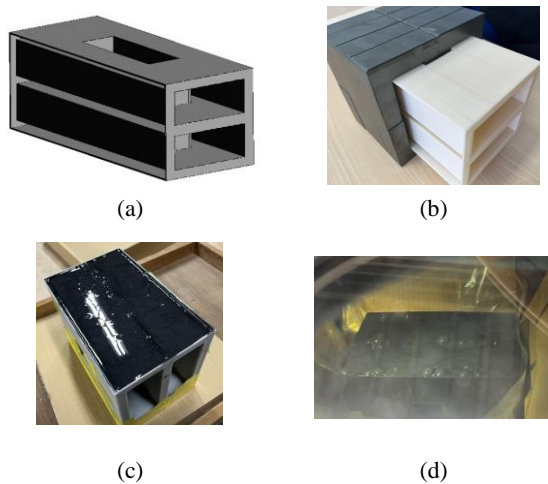


Fig. 5. Bobbin molded transformer creation procedure.
(a) Design in 3D CAD, (b) Printed by 3D printer, (c) Resin insertion, (d) Vacuuming



Fig. 6. Transformer molded only in the electric field concentration area.

3. 実験結果

<3・1> 試験結果

Table 1 に実験のパラメータを、Fig. 7 に試作した DC/DC コンバータを示す。本試験では周波数は 30 kHz の設計であったが、共振回路から周波数の調整を行い、インバータからトランスの電圧電流を 15° 程度遅らせることによりゼロ電圧スイッチングを達成できるようにした。なお、本試験はトランス巻線が巻かれた開口部にファンを当てる強制空冷を用いた。

Fig. 8 に回路動作時のインバータの出力とトランスの動作波形を示す。Fig. 8 より、トランスが正常に動作しており、インバータの出力電圧よりインバータ出力電流が遅れていることからゼロ電圧スイッチングを達成していることがわかる。

Table 1. Parameters of the prototype.

Parameter		Value
Input DC voltage	V_{in}	750 V
Output DC voltage	V_{out}	375 V
Rated power	P	20 kVA
Resonant frequency	f	29.12 kHz
Number of turns	N_1	8 Turn
	N_2	4 Turn
Self-inductor	L_1	1.91 mH
	L_2	4.82 μ H
Coupling coefficient	k	0.947
Resonant inductor	L_r	487 μ H
Resonant capacitor	C_r	56 nF
Snubber capacitor	C_{snb}	6800 μ F
Smoothing capacitor	C_{smo}	14100 μ F
MOSFET	S_{1-4}	BSM120D12P2C005
Rectifier (IGBT)	D_{1-4}	7MBR100VB060-50

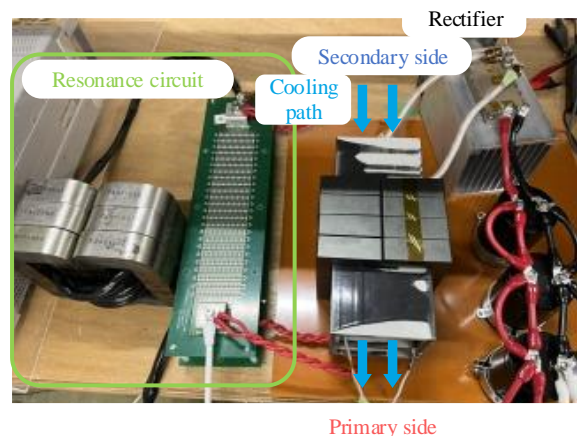


Fig. 7. Prototype DC/DC converter.

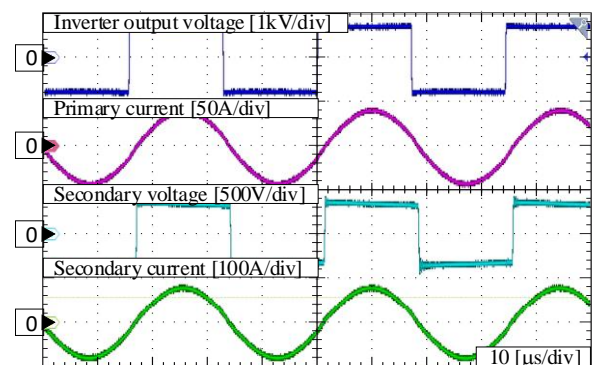


Fig. 8. Transformer operating waveform during rated operation.

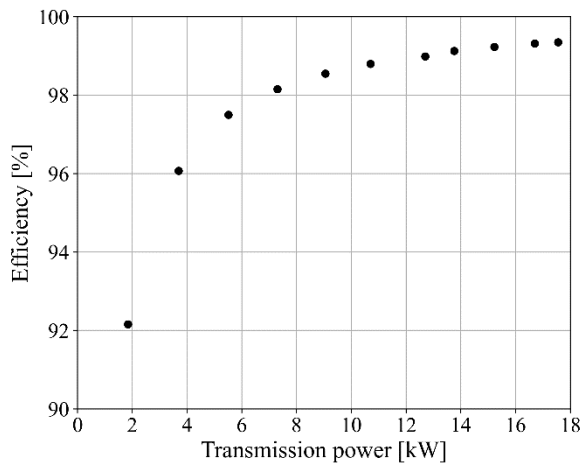


Fig. 9. Transformer efficiency characteristics.

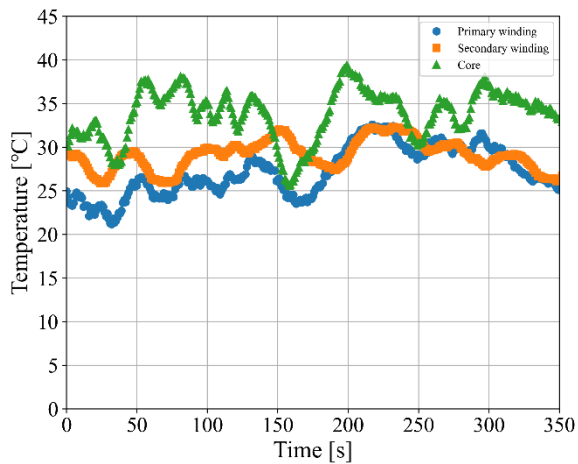


Fig. 10. Temperature characteristics of transformer in rated operation. snubber capacitor.

Fig. 9 に今回作成したトランスの効率特性を示す。Fig. 9 より、軽負荷運転時には無負荷損失が支配的であるため効率が 92%程度にとどまるものの、伝送電力上昇に伴い損失全体の内無負荷損失の割合が減少することで、定格付近での効率は 99.4% (17.6kW 出力時) に達することが確認できた。

Fig. 10 に定格運転時のトランスの一次側、二次側の巻線とコア温度特性を示す。なお、1 s サンプルで測定した測定値に対し、20 s で移動平均を取った結果である。Fig. 10 より回路動作中はノイズの影響により、温度特性が不規則に振動しているものの、試験終了時の温度は測定開始前に対してほとんど変化しておらず、温度上昇を強制空冷を採用可能なモールド構造によって抑制可能であることが確認できた。

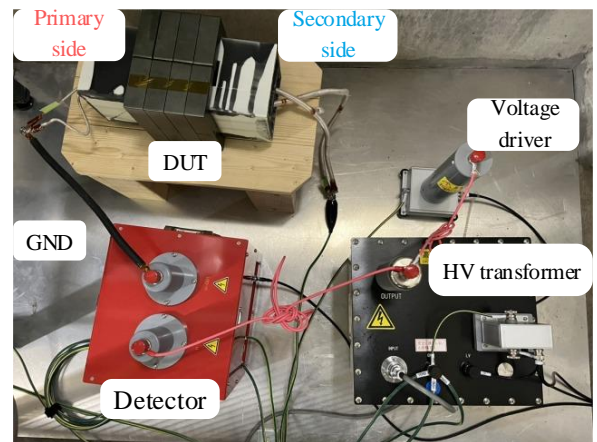


Fig. 11. Test environment for partial discharge testing of a transformer prototype.

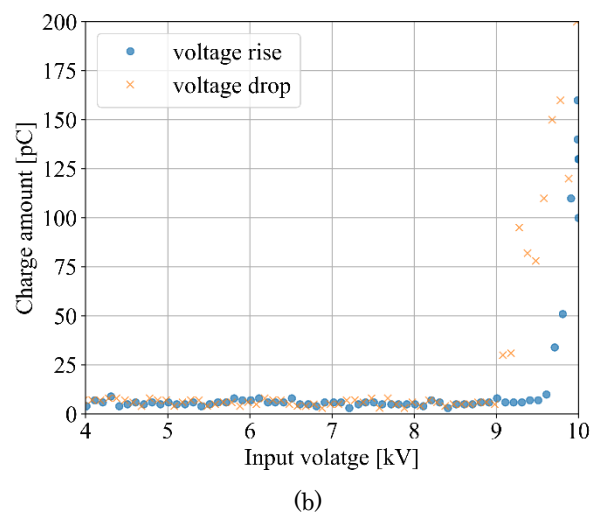
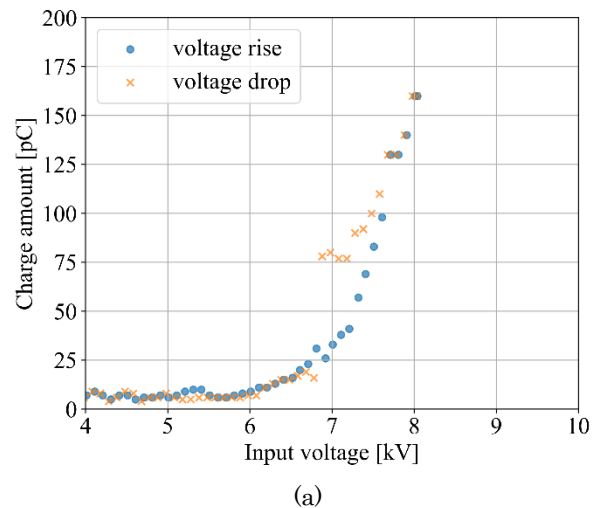


Fig. 12. Test results for partial discharge. (a) Proposed molded structure, (b) Conventional molded transformers

<3・2> 部分放電試験

開発したトランスに対して部分放電試験を実施した。Fig. 11 に部分放電試験の試験環境を示す。本試験では放電の閾値を 50 pC に設定して試験を行い⁽¹⁷⁾、閾値を超える電圧である放電開始電圧の測定を行った。一次側巻線と二次側巻線の耐圧を測定するため、一次側巻線及び二次側巻線はそれぞれ短絡させて試験をする。また、本試験で用いる部分放電試験機は DAC-PD-3 (SOKEN ELECTRIC CO.,LTD)である。

Fig. 12 に部分放電試験の試験結果を示す。Fig. 12 (a)は提案するモールド構造、Fig. 12 (b)従来のモールド構造の試験結果となっている。この結果より、提案するモールド構造の放電開始電圧は 7.32 kV、従来のモールド構造は 9.81 kV である。巻線を覆うことで絶縁しているため、従来のモールド構造の方が絶縁性能は高くなっているが、提案するモールド構造でも 6.6 kV の絶縁性能を達成しており、十分な絶縁性能があることが確認できた。

4. まとめ

本稿では、ISOP 接続構成の SST に用いられる DC/DC コンバータに向けて高周波モールドトランスを開発し実機検証を行った。高周波モールドトランスで問題となる交流抵抗の増加による巻線温度の上昇を抑制するため、電界集中部のみにモールドを施すことで、巻線を強制空冷可能な構造を採用した。

開発したトランスを用いた SST 用セルを構築し、実機試験において、伝送電力 17.6 kW 時に効率 99.4 %を達成することを確認した。また、開発したトランスに対して部分放電試験を行い、従来の巻線全体をモールドした構造に対して絶縁性能は低下するものの、6.6 kV 用 SST に求められる絶縁性能を達成可能であることを示した。

謝辞

この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP14004) の結果から得られたものである。

文 献

(1) L. Zheng et al., "Solid-State Transformer and Hybrid Transformer With Integrated Energy Storage in Active Distribution Grids: Technical and Economic Comparison, Dispatch, and Control," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 3771-3787, Aug. 2022.

(2) 菊地尚斗, et al.: 「チョップセルを用いた単相 Solid-state Transformer の高パワー密度化に向けた単相電力脈動補償法」, 電気学会研究会資料. SPC= The papers of technical meeting on semiconductor power converter, IEE Japan/半導体電力変換研究会 [編]. 電気学会, 2020. p. 1-

6.

(3) S. A. Saleh et al., "Solid-State Transformers for Distribution Systems—Part II: Deployment Challenges," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 5708-5716, Nov.-Dec. 2019.

(4) G. Ortiz, M. G. Leibl, J. E. Huber and J. W. Kolar, "Design and Experimental Testing of a Resonant DC–DC Converter for Solid-State Transformers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 7534-7542, Oct. 2017.

(5) E. S. Lee, J. H. Park, M. Y. Kim and J. S. Lee, "High Efficiency Integrated Transformer Design in DAB Converters for Solid-State Transformers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 7147-7160, July 2022.

(6) S. Chen and T. Czaszejko, "Partial discharge test circuit as a spark-gap transmitter," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 36-44, May-June 2011.

(7) R. Agarwal, H. Li, Z. Guo and P. Cheetham, "The Effects of PWM With High dv/dt on Partial Discharge and Lifetime of Medium-Frequency Transformer for Medium-Voltage (MV) Solid State Transformer Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 4, pp. 3857-3866, April 2023.

(8) J. Jiang, W. Chen, Y. Song and Z. Shen, "Active Control Strategy of Partial Discharge for Insulation of High-Power High-Voltage High-Frequency Transformers (H3Ts)," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 7, pp. 7521-7524, July 2023.

(9) I.-J. Seo, U. A. Khan, J.-S. Hwang, J.-G. Lee and J.-Y. Koo, "Identification of Insulation Defects Based on Chaotic Analysis of Partial Discharge in HVDC Superconducting Cable," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, June 2015, Art no. 5402005.

(10) O. Kessler, "The Importance of Partial Discharge Testing: PD Testing Has Proven to Be a Very Reliable Method for Detecting Defects in the Insulation System of Electrical Equipment and for Assessing the Risk of Failure," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 18, no. 2, pp. 62-65, March-April 2020.

(11) L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modeling," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 4, pp. 510-528, Aug. 1995.

(12) C. Thirumurugan, G. B. Kumbhar and R. Oruganti, "Effects of impurities on surface discharges at synthetic ester/cellulose board," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 1, pp. 64-71, Feb. 2019.

(13) Z. Guo et al., "A Novel High Insulation 100 kW Medium Frequency Transformer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 112-117, Jan. 2023.

(14) R. Yonetomi, K. Kusaka, N. Koike and S. Nagai, "Partial Discharge Test of High-frequency Transformers with Plastic Mold for SST," 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia), Chengdu, China, 2024, pp. 3007-3012.

(15) Z. Yi, K. Sun, H. Liu, G. Cao and S. Lu, "Design and Optimization of the Insulation of Medium-Voltage Medium-Frequency Transformers for Solid-State Transformers," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 3561-3570, Aug. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3094674.

(16) Z. Guo et al., "A Novel High Insulation 100 kW Medium Frequency Transformer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 112-117, Jan.

(17) 上羽 正堯: 「モールド絶縁の寿命に対する部分放電の影響」, 三重大学大学院工学研究科修士論文, 2014.