

修士学位論文要約（平成29年3月）

高温超電導ケーブル用ヒートパイプの伝熱特性とケーブル冷却特性に関する研究

榊原 稜二

指導教員：津田 理， 研究指導教員：宮城 大輔

Study on Heat Transfer Characteristics of Heat Pipe for HTS Cable and Cooling Characteristics of HTS Cable with Heat Pipe

Ryoji SAKAKIBARA

Supervisor: Makoto TSUDA, Research Advisor: Daisuke MIYAGI

Recently, the global warming and the fossil fuel drying up worsen, and it is required to utilize an electric power with a low-loss and a high-efficiency. A power cable of the High Temperature Superconductor (HTS) application that can realize the low-loss and larger capacity than a conventional power cable. In this paper, it is assumed that the HTS cable is used for the submarine cable such as a power facilities in the offshore wind power system and the power cable across the continent. Since it is difficult to install a cooling station at the bottom of the sea, the HTS cable is required to transmit long distances at one cooling station. In this paper, we proposed a new cooling method in order to achieve the further longer distance of the HTS cable. It combines heat transport by the heat pipe and the LN₂. We analyzed the steady state in the HTS tri-axial cable with the heat pipe due to the analysis of the thermal characteristics and the fluid characteristics. Next, we investigated design guidelines for the tri-axial cable with the heat pipe suitable for long distance.

1. はじめに

超電導ケーブルは既存の銅ケーブルに比べ、大容量で低損失な送電を可能としコンパクトな形状であることから、洋上風力送電施設や大陸間横断用ケーブルなどの海底ケーブルへの適用が期待される。しかし、海底ケーブルには数十 km 以上の長尺ケーブルが要求され、現状これを満足する超電導ケーブルは存在しない。そこで超電導ケーブルの長距離化を目的に、従来の液体窒素による冷却に加え、ヒートパイプによる伝導冷却を組み合わせた新しい冷却方法を提案し、ヒートパイプを適用した超電導ケーブルの伝熱特性・流体特性解析によって、ヒートパイプの適用効果および長距離化に適したケーブル設計指針について検討した。

2. 解析手法

図 1 に解析モデルを示す。超電導ケーブルの導体部分は故障電流分担の銅テープ、超電導線、絶縁層の PPLP®により構成される。超電導ケーブルは外部からの熱侵入による熱的損失が支配的であるため、ヒートパイプをケーブル最外層に設置した。解析に用いた主な諸元は「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を参考としている。

ケーブル導体部及びヒートパイプは式(1)の固体における軸対称三次元熱伝導方程式、流路部は式(2)

の流体における長手方向一次元熱伝導方程式を用いて、ケーブル内部の伝熱解析を行った。

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = 0 \quad (1)$$

$$\rho c v_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (2)$$

ただし、 T は温度、 ρ は密度、 c は定圧比熱、 k は熱伝導率、 v_z は冷媒流速、 Q は交流損失、渦電流損失、誘電体損失、流体の摩擦損失である。境界条件として、ケーブル半径方向外側に熱侵入を与えた。

図 2 にヒートパイプの断面模式図を示す。ヒートパイプは蒸発、凝縮のサイクルを連続的に行うことで熱輸送を行う素子であり、潜熱を使用するため大量の熱輸送ができる。ヒートパイプを超電導ケーブルに適用することで、ケーブル内部の発熱を吸収し、外部に輸送できると考えられる。ヒートパイプは正常動作時潜熱によって吸熱するため、本解析において内部の液体は等温であると仮定した。またヒートパイプの限界熱輸送量は式(3)の飛散限界により算出した。

$$Q_{crit} = A_v L \sqrt{\frac{\rho_v \sigma}{d}} \quad (3)$$

ただし A_v は蒸気通路断面積、 L は潜熱、 ρ_v は蒸気密度、 σ は表面張力、 d は毛細管直径である。

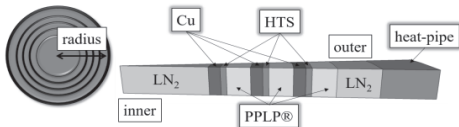


図1 ヒートパイプ適用ケーブルの解析モデル。

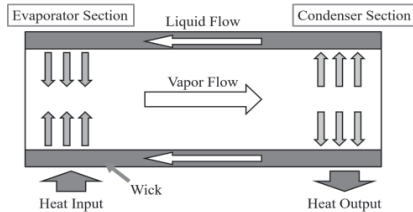


図2 ヒートパイプの断面模式図。

3. ヒートパイプ適用ケーブルの伝熱特性、流体特性解析

外径一定の条件における超電導ケーブルとヒートパイプ適用ケーブルそれぞれの損失を図1、伝熱特性と流体特性のケーブル長依存性を図2に示す。ただし、流量は40 L/min.、ヒートパイプ径は10 mmφである。図1、図2より、ヒートパイプの適用によって外側流路断面面積が減少し冷媒の摩擦損失及び圧力損失が増加するが、ヒートパイプの吸熱効果により温度上昇を抑制できる。また、ヒートパイプ適用ケーブルにおいて、ケーブル長が増加するとある一定値以上冷媒の温度が上昇しないことがわかる。これはケーブル長が増加するに伴い、冷媒の流動による長手方向に伝熱する作用よりも、径方向へのヒートパイプの吸熱作用が影響したためであると考えられる。

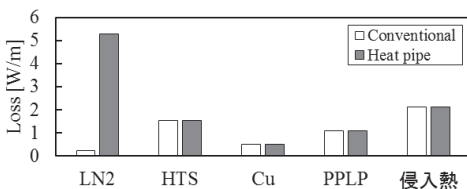


図3 超電導ケーブルの各損失。

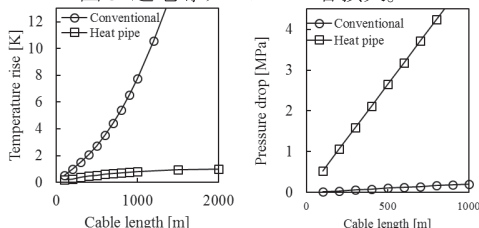


図4 伝熱特性、流体特性のケーブル長依存性。

4. 長距離化に適したヒートパイプ適用ケーブルの設計指針

長距離化を目的としたヒートパイプを適用した超電導ケーブルの設計指針を明確にする。前章までの結果より、ヒートパイプ適用ケーブルの外径が小さいと

外側流路の圧力損失が増加し、外径が大きいと侵入熱が増加する。加えて外径の増減によってヒートパイプ適用本数が増減する。中でも、限界熱輸送量が増加する影響が大きいため、ヒートパイプ適用ケーブルの外径は、敷設時や制作時に存在する制約まで大きくした方がよい。また、ヒートパイプの径を大きくすると、ヒートパイプ内部の蒸气流路断面面積が増加し限界熱輸送量が増加するが、外部からの侵入熱は増加する。しかし、ヒートパイプの限界熱輸送量は式(3)より、ヒートパイプの気体通路断面面積に比例し、外部からの侵入熱はケーブル表面積、すなわちケーブルの外径に比例する。故にヒートパイプの限界熱輸送量が増加する効果の方が支配的であり、敷設時や制作時に存在する制約までヒートパイプの外径は大きくした方がよい。

以上の設計指針に基づき、ヒートパイプ適用ケーブルを設計し、従来の超電導ケーブルの最長距離と比較を行った。ただし本検討において、送電可能なケーブル長は、液体窒素の温度が70Kから77Kまで上昇する距離、液体窒素の圧力が1.0MPaから0.2MPaに減少する距離、ヒートパイプの熱輸送量が限界値以下であることを条件とし算出した。従来の超電導ケーブルとヒートパイプ適用ケーブルの最長距離を図5に示す。ただしヒートパイプ径は30 mmφ、流量は40 L/min.、ケーブル外径は300 mmとした。

図5より、超電導ケーブルにヒートパイプを適用することで、伝熱特性が改善され長距離化を可能とすることがわかった。

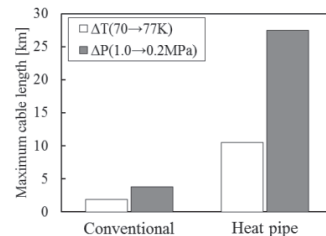


図5 送電可能なケーブル最長距離。

5. まとめ

超電導ケーブルの長距離化を目的に、ヒートパイプによる伝導冷却をケーブルに組み合わせた新しい冷却方法を提案し、ヒートパイプ適用ケーブルの伝熱特性・流体特性解析によって、ヒートパイプの適用効果および長距離化に適したケーブル設計指針について検討した。設計指針に基づくヒートパイプ適用ケーブルの最長距離は10.5kmを達成し、従来よりも長距離化が見込まれることを明らかにした。

文献

- 1) M.Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.11