

常電導転移型超電導限流器による過電流保護に関する研究

Power Fed Protection Using Super-to-Normal Transition Type
Fault Current Limitation

西原太一

Taichi Nishihara

論文概要

超電導現象の発見から 100 年を経て、MRI に代表される実用化技術も現れている。超電導技術は、エネルギーの高効率利用に有効なだけでなく、その特徴を用いて、既存技術では実現できない機器への展開が期待される。これらの機器を超電導状態に保つために、極低温に冷却する必要がある。1987 年の C. W. Chu らによる超電導転移温度 90 K 級の酸化物超電導体が発見されるに至って、液化窒素浸漬冷却での応用が可能となり、超電導送電ケーブルや超電導電動機、超電導限流器などが、再度脚光を浴びている。

高温超電導体は、超電導状態から常電導状態への相転移(S/N 転移)が金属系のようには明確ではなく、磁束流状態と言われる遷移現象が存在する。実用化に当たっては、この遷移現象の理解と活用が必須である。そこで、超電導応用機器実用化のため、S/N 転移の解析式を提案した。これを用いて、世界的にも注目の高い超電導送電ケーブルの解析、さらに超電導限流器の解析を行い、超電導技術の実用化への一提案を行った。

第 1 章において、世界的にも非常に注目を浴びている鉄道系統の超電導送電ケーブルと、この超電導送電ケーブル保護を目的とした超電導限流器への検討を提案している。超電導送電ケーブルは、直流系統への導入を目的としており、電流密度の高さ、さらに交流損失が無いために非常に親和性が高い。さらに電圧降下対策、新規・既存の変電所の用地確保問題の解決、そして回生失効対策と鉄道固有の問題を多く解決可能であることを示している。超電導限流器は、平常時はエネルギー損失や電圧降下がなく、故障電流通電時はインピーダンスを発現させることにより、故障電流を抑制する電力機器である。

第 2 章では、超電導の微視理論である BCS 理論を紐解き、現象論による第 1 種、第 2 種超電導体の存在を説明した GL 理論を紹介している。さらに、実用高温酸化物超電導線材の展開についても言及している。また、超電導応用システムの例とし

て、超電導送電ケーブルの主要プロジェクト、特に直流送電システムについて解説し、超電導限流器について触れている。最後に、本研究の適用対象である鉄道送電ケーブルについて述べている。

第3章では、S/N転移中の高温酸化物超電導線材の熱特性、電気特性を表す解析モデルの構築を行った。電気特性としてS/N転移中、特に高温超電導体において抵抗率が電流密度に依存していることを示した。次に、電流依存性を考慮した抵抗が電気特性に与える影響についての検討を行った。抵抗率に電流密度依存性が存在すると、起電力に相当する効果が発生する。この起電力は、抵抗率の電流変化率に対応した起電力相当分であり、常電導状態であれば零となる。さらに電流依存性を考慮した電圧表式を用いた単純化モデルによるエネルギー最小原理からも同様の結果が導出される。電気工学において、磁束と電流は双対関係にあるとされている。そこで磁束に関する超電導固有の現象から、磁束の量子化現象と比較をした。両現象ともに超電導状態と常電導状態を混在させることでエネルギー最小状態を保っており、双対関係をよく説明が出来る。以上から電流依存性がある抵抗の場合、つまりS/N転移中の超電導体の抵抗を、エネルギー最小原理に基づいた起電力相当分が発生するとしてモデルを構築した。次に熱特性としては、臨界電流、熱容量、熱伝導率などに温度依存性を考慮した。これらの特性から電気-熱の連成解析を構築した。構築したモデルをBi系超電導テープ線材や、Y系超電導薄膜を用いた実験結果と解析結果の比較を行い、解析モデルの妥当性を検証した。

第4章では、解析モデルのシステムへの適用性を検討するため、直流鉄道系統解析モデルの構築を行った。鉄道固有のシステムである、回生システムは一定電力を出力するとした。車両から出力される回生電力は、運動エネルギー、走行抵抗、変換効率、補機エネルギー(照明、空調機等)を考慮し算出した。対象とした直流鉄道系統は、多様な要素の組み合わせを持つ。そこでグラフ理論を用い、汎用的に適用できるモデルとした。さらに超電導ケーブルを電氣的に単純化して、抵抗とインダクタンスによって表現した。この時、変電所間を超電導ケーブルによって直接接続したものを解析モデルとした。このモデルにおいて変電所直下でのき電線-レール短絡事故(最過酷)が発生した場合の解析を行った。なお超電導ケーブルには熱侵入が原因となる温度分布が存在する。その結果、臨界電流の温度依存性により、臨界電流にも温度分布が発生することを考慮した。この結果、超電導ケーブルは、故

障電流通電時に S/N 転移が発生し、超電導ケーブルに抵抗が発現することが示された。その結果、故障電流が抑制されることも示された。この現象は、超電導ケーブル自身が超電導限流器としての特性を持っていることを示している。しかし、限流器として動作した場合、超電導ケーブルの温度上昇が伴うことも示された。そこで設計条件を変えることで、超電導ケーブルの限流効果についての検討をおこなった。まず回生電力の変化の検討を行った。これは回生電力の大小によって、超電導ケーブルの限流効果と温度変化への影響を検討するためである。この結果、故障直後の電流変化には電力量の影響があったが、最終的には、回生電力の大小に因らず、一定電流値に収束した。これは超電導ケーブルの抵抗値が十分に上昇したために、変電所電圧が支配的となったためであると考えられる。ついで、超電導ケーブルの冷却条件（温度設定及び、断熱効果）の影響についての検討を行った。この結果、超電導ケーブルの設定温度を下げる、臨界電流を上昇させることが可能であった。運転温度を下げると限流後の故障電流が増加し、周辺機器の短絡容量増加によるコスト増加の懸念があることが示された。断熱条件については、断熱理想的に行われた場合、超電導ケーブルは均一に温度上昇を発生させる。温度分布の差が大きくなるに従い、高温部における温度上昇が大きくなる。これは臨界電流が減少するため、ジュール損失による発熱時間が長くなったためであると考えられる。さらに超電導ケーブルの構造の検討をした。超電導線材の本数を変化させた場合、臨界電流の変化によって、限流後の故障電流に大きく変化が起きた。超電導線材の使用量を増加すれば、超電導ケーブル温度の温度上昇の抑制が可能であることも示された。これらの結果、故障電流の抑制と超電導ケーブルの温度上昇はトレード・オフの関係にあることが示された。超電導ケーブル設計には、周辺機器の接続を含めた検討が必要であることを示しており、本解析モデルの有用性を示す結果となった。さらに超電導限流器を導入した場合における超電導ケーブルの温度変化と限流電流、そして超電導限流器の温度上昇についての検討を示した。この結果、超電導限流器の導入により超電導ケーブルの温度上昇を完全に抑制することが可能であることを示した。このことは、復旧時間への制限がある場合や、冷凍機からの距離が離れている場合など温度変化を発生させてはならない場合などのような状況において有効であることを示している。

第 5 章では本論文で得られた結果を取りまとめている。

Power Fed Protection Using Super-to-Normal Transition Type Fault Current Limitation

Taichi Nishihara

100 years from the discovery of superconducting phenomena, applied superconductivity have been utilized practically such as MRI and so on. These technologies are expected to be applied not only high efficiency of energy use but also new equipment without superconducting properties. To utilize the superconductivity, all the equipment should be maintained at low temperature. In 1987, C. W. Chu et al. discovered an oxide superconductor with a superconducting transition temperature over 90 K. It means possibility to use it under liquefied nitrogen immersed cooling. The feasibility of superconducting power transmission cable, superconducting electric motor, superconducting fault current limiter, and so on are recognized again.

The phase transition (so call S/N transition) from the superconducting state to the normal-conducting state of a high temperature superconductor is not steep as a low temperature metal superconductor, and there is a transition phenomenon called a magnetic flux flow state. Understanding and utilizing this transition phenomenon are essential for practical application. Therefore, for practical use of superconducting applied equipment, an analytical expression of S/N transition has been proposed. Applying to the superconducting transmission cables, which are also attracting attention globally, and the superconducting fault current limiters have been analyzed. A proposal for practical application of superconducting technology have been carried on.

In chapter 1, integrating the superconducting transmission cable to the railway system, which is receiving great attention globally, and operating as a superconducting fault current limiter to protect this superconducting power transmission cable. The DC superconducting power transmission cable is well matched with a DC railway system, due to its high current density and no AC loss. Furthermore, many solutions for the voltage drop, problem of new / existing substation, the regenerative invalidation are described. A superconducting fault current limiter is a new electric power device which suppresses a fault current with the impedance yielded by the fault current without energy loss in an ordinary.

In chapter 2, the GL theory, which shows the existence of the type I and type II superconductor phenomenologically, following the BCS theory, which is the microscopic theory of superconductivity. Furthermore, the development of practical high temperature oxide

superconducting wires is mentioned. As examples of an applied superconducting system, major projects of superconducting transmission cable, especially direct current transmission systems and mention superconducting fault current limiter are described. Finally, as the target of the analyzing method, the railway cable system has been defined.

In chapter 3, an analytical model has been built, which gives the thermal and electrical characteristics of high temperature oxide superconducting wire under S/N transition. It showed that the resistivity depends on current density during S/N transition as electric characteristics, especially high temperature superconductor. Next, investigated that the effect of resistance considering current dependence on electric characteristics. When the resistivity has current density dependence, an effect corresponding to electromotive force occurs. This electromotive force is equivalent to the electromotive force corresponding to the current change rate of the resistivity and becomes zero in the normal conducting state. Furthermore, similar results are derived from the energy minimum principle based on a simplified model using a voltage table expressing the current dependence. In electrical engineering, magnetic flux and current are said to be in a dual relationship. Therefore, it was compared that the flux quantization phenomenon from the phenomenon inherent to superconductivity related to magnetic flux. Both phenomena maintain the energy minimum state by mixing the superconducting state and the normal conducting state, and it is possible to explain the dual relationship well. Based on the above, in the case of a resistor with current dependency, that is, a model is constructed assuming that the resistance of the superconductor during the S/N transition is equivalent to the electromotive force based on the energy minimum principle. Next, the thermal dependence of the critical current, heat capacity, thermal conductivity, etc. was taken into consideration as thermal characteristics. From these characteristics, it had been constructed a coupled analysis of electro-thermal. It was compared the constructed model with experimental results using Bi type superconducting tape wire and Y type superconducting thin film and the analysis result and verified the validity of the analysis model. In Chapter 4, It was constructed a direct current railway lineage analysis model to study the applicability of the analysis model to the system. The regenerative system, which is a system unique to the railway, supposed to output constant power. The regenerative electric power output from the vehicle was calculated taking into consideration kinetic energy, running resistance, conversion efficiency, auxiliary machinery energy (lighting, air conditioner, etc.). The targeted DC railway line has a combination of various elements. Therefore, using graph theory, it was set as a model that can be applied generically. Furthermore, the superconducting cable was electrically

simplified and expressed by resistance and inductance. At this time, an analysis model was adopted in which substations were directly connected by a superconducting cable. Analysis was carried out in this model when a worn-off rail short circuit accident (most severe) occurred directly under the substation. In the superconducting cable, a temperature distribution due to heat invasion exists. As a result, due to the temperature dependency of the critical current, it was considered that a temperature distribution also occurs in the critical current. As a result, superconducting cables showed that S/N transition occurred when the fault current was applied, and resistance appeared in the superconducting cable. As a result, it was also shown that the fault current is suppressed. This phenomenon indicates that the superconducting cable itself has characteristics as a superconducting fault current limiter. However, when operating as a current limiter, it was also shown that the temperature of the superconducting cable increased. Therefore, it was investigated the current limit effect of superconducting cable by changing design conditions. First it was examined the change of regenerative power. This is to investigate the effect of the superconducting cable on the current limit effect and temperature change, depending on the magnitude of regenerative power. As a result, the current change immediately after the failure was influenced by the amount of electric power, but eventually converged to a constant current value regardless of the magnitude of regenerative power. This is probably because the substation voltage became dominant because the resistance value of the superconducting cable sufficiently increased. Next, the influence of the cooling condition (temperature setting and heat insulating effect) of the superconducting cable was investigated. As a result, it was possible to lower the set temperature of the superconducting cable and increase the critical current. It was shown that when the operation temperature is lowered, the fault current after the current limit increases, there is concern that the cost increases due to the increase of the short circuit capacity of the peripheral equipment. Regarding the adiabatic condition, when insulation is ideally performed, the superconducting cable generates a uniform temperature rise. As the difference in temperature distribution increases, the temperature rises at the high temperature portion increases. This is thought to be since the critical current decreases and the heat generation time due to Joule loss increases. It was also examined the structure of the superconducting cable. When the number of superconducting wires was changed, a large change occurred in the fault current after current limiting due to the change in the critical current. It was also shown that the temperature rise of the superconducting cable temperature can be suppressed by increasing the amount of superconducting

wire used. As a result, it was shown that the suppression of the fault current and the temperature rise of the superconducting cable are in a trade-off relationship. In superconducting cable design, it is necessary to consider connection including connection of peripheral devices, and it shows the effectiveness of this analysis model. It was also examined temperature change and current limit of superconducting cable and temperature rise of superconducting fault current limiter when introducing superconducting fault current limiter. As a result, it was shown that the temperature rise of the superconducting cable can be completely suppressed by introducing the superconducting fault current limiter. This indicates that it is effective in situations such as when there is a restriction on restoration time or when a temperature change should not occur, such as when the distance from the refrigerator is far away.

Chapter 5 summarizes the results obtained in this paper.