

報告番号	甲 第 14056 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 超電導ケーブル導入時における系統事故の影響と対応に関する研究  
(Research on the impacts of grid accidents for superconducting cables and their countermeasures)

氏 名 増田 孝人

### 論 文 内 容 の 要 旨

超電導ケーブルは大容量の電力をコンパクトな形状で、低損失に送電することができ、大都市での地下送電ケーブルや変電所間を結ぶ電線路への応用が期待されている。既に世界各国で実線路での実証試験が行われており、これまでの試験や運転結果から、超電導ケーブルは安定に電力送電できることが実証されている。一方、既存の電力ケーブルでもいえることであるが、長時間使用を続けることによる経年劣化や、外的要因による損傷などでケーブルに不具合が起こり、大きな事故を引き起こすことが考えられる。特に、系統の短絡事故や地絡事故により超電導ケーブルの断熱管が破損した場合、あるいは液体窒素の圧力が上昇して断熱管が破裂した場合には、液体窒素が外部に噴出し、周囲の設備や人に冷却による損傷や、閉塞空間に漏れ出した場合の酸欠などを引き起こし、公衆災害となる危険性がある。

本研究では、超電導ケーブルに想定される事故のうち、(1)超電導ケーブルに短絡電流が流れた場合、(2)超電導ケーブルに地絡事故が起こった場合、の2ケースについて、模擬試験等でデータを収集し、実規模ケーブルを想定したシミュレーションを行うことで事故時の超電導ケーブルへの影響を把握・解析し、事故の影響を軽減する方策を検討した。

第1章では、研究対象である超電導ケーブルの初期導入時のコストや送電損失について計算を行い、それぞれ CV ケーブルの 60%に低減できることが判り、超電導ケーブルの実用化にメリットがあることを示した。続いて、その超電導ケーブルが世界各国で開発され

ていることを記述し、その期待度が大きいことを示した。次に、実用運転の例として横浜プロジェクトでの超電導ケーブル実証運転の結果から、通常時には電力を安定に送電できることを示した。これまでの超電導ケーブルの実証試験や結果から、通常時には安定に運転できることが判ったが、事故時の対応策が検討されていないことを指摘し、事故時の現象把握とその影響を軽減する方策を検討することとした。

第2章では、超電導ケーブルの構造と電氣的設計手法について記述した。

超電導ケーブルでは、交流損失を最小にすることが重要で、各層電流を均流化する方法について記述し、計算結果として各層のスパイラルピッチを示した。その結果、短尺ケーブルの試験結果で超電導導体と超電導シールドの交流損失の和が、 $1\text{ W/m/ph@2kA}$  以下になることを実証した。

電気絶縁設計としては、超電導ケーブルの試験電圧の計算方法について記述し、交流耐電圧試験値が  $90\text{kV}$ 、雷インパルス耐電圧試験値が  $\pm 385\text{kV}$  であることを示した。それらの試験電圧と絶縁材料である液体窒素中の PPLP の特性から、電気絶縁層の厚みを計算し、 $5.3\sim 5.5\text{mm}$  の厚みが必要であることを示した。尚、横浜プロジェクトでは裕度を考慮し設計厚みとしては  $7\text{mm}$  とした。

第3章では、超電導ケーブルに短絡電流が流れた場合の現象解析や、その対応について検討した。

横浜プロジェクトで超電導ケーブルが布設された旭変電所での短絡電流解析から、即時再送電不要な場合は最大で  $18\text{kA}$ 、 $2\text{sec}$ 、即時再送電が必要な場合は最大で  $10\text{kA}$ 、 $2\text{sec}$  の短絡電流が流れることが判った。ただし、再送電不要な場合は、遮断器の規格から  $31.5\text{kA}$ 、 $2\text{sec}$  とした。上記のような大電流が超電導ケーブルに流れる場合、超電導線を増やすのではなく、銅撚線フォーマや銅シールドに短絡電流が迂回する構造を考案し、フォーマ、銅シールドのそれぞれの断面積を  $140\text{mm}^2$ 、 $80\text{mm}^2$  とした。

長尺超電導ケーブルに短絡電流が流れた場合、その発熱による液体窒素の温度・圧力への影響を調べるため、 $40\text{m}$  超電導ケーブルシステムを構築し、短絡模擬試験を実施した。温度の実測値は開発した計算コードによる計算値と概ね一致することが判った。圧力については2つのピークが発生することが判り、**peak A** については、超電導シールド層の発熱による液体窒素の気化が原因であることを示した。**peak B** についてはシステム内の気相体積の変化によることが判り、計算コードに反映した。

次に、実用化時を想定した  $3\text{km}$  超電導ケーブルをモデルとして、短絡電流が通過した際の各部の温度・圧力を開発したコードで計算を行い、現象の把握を行った。 $31.5\text{kA}$ 、 $2\text{sec}$  の場合、液体窒素の温度・圧力は、それぞれ  $3000$  秒後に  $112\text{K}$ 、 $3\text{MPaG}$  の最大値をとるが、断熱管の破裂圧力  $15\text{MPaG}$  より小さく破裂は起こらないことが判った。導体部の温度解析から超電導導体の温度は1時間以上もの間  $92\text{K}$  ( $2000\text{A}$  での導体臨界温度) を超え

ており、即時再送電ができないことを示した。一方、10kA、2sec の場合は超電導部の温度は 76K までしか上昇せず、超電導状態を維持することができるので、即時再送電が可能であることを示した。

第4章では、超電導ケーブル内部で絶縁破壊による地絡が発生した場合、断熱管が破損し液体窒素が漏洩しないように保護層の検討を行った。尚、地絡電流は 66kV 系統での最大値である 1.5kA、継続時間 2sec とした。

まず、保護層の材料や構成を検討するためにシート試験を行い、アラミド繊維を積層する構成が保護層に適していることが判った。しかしながら、ケーブルコア試験では、シート試験で選定したアラミド繊維の構成では断熱管に見立てたコルゲート管を保護できず貫通する結果となった。このシート試験とケーブルコア試験との相違について、地絡時のアークにより構成材料が気化して発生する高温ガスの挙動が影響しているとの仮説をたて、保護シートをシート試験の形状に近い縦添えシート試験を行った。その結果、高温ガスの逃げ代が大きくなるほど少ない枚数のアラミド繊維でより長い時間コルゲート管を保護できることが判り、断熱管を保護する手法として保護シートの縦添え配置が有効であることを示した。この高温ガスの影響を小さくすることを目的に、アラミド繊維とアラミド紙を組合せた保護層を検討し、シート試験により 1.5kA、2sec で SUS 板を貫通せず、発生エネルギーが最小となる構成を見出した。そのアラミド繊維とアラミド紙を組み合わせた保護シートを縦添え配置した試験を行い、保護シートが 9mm 以上でコルゲート管を保護できることが判った。しかしながら、この厚みでは超電導ケーブルのコンパクト性が失われるので、保護シートを薄くし断熱管が破損することを許容することとした。そこで、コルゲート管が破損する地絡条件を調査し、保護シートの厚み 3.6mm と 7.2mm の場合、断熱管を破損する地絡エネルギーは、それぞれ約 50kJ、100～150kJ であることが判り、断熱管を破損する目安の地絡エネルギーを得ることができた。

次に、断熱管が貫通する場合を想定し、マンホールに液体窒素が漏洩した場合の現象把握と解析を行った。小型マンホールを使った液体窒素漏洩試験を実施し、床面温度や内部の圧力変化の実測値が、開発した計算手法による計算結果とよく一致することを示した。さらに、実規模マンホールの 1/4 モデルのマンホールを用いて液体窒素の漏洩試験を行い、床面の温度変化や液体窒素の貯液レベルを実測した。それらの結果が開発した計算手法による計算結果と良く一致することが判り、その計算手法が実規模マンホールでの解析に有効であることを示した。尚、マンホール内の酸素濃度はすぐに酸欠レベルになる結果となり、マンホールに入坑する際は万一の事故に備えて運転を停止するなどの処置を行うべきと考える。

第5章では、実系統に導入した超電導ケーブルにこれらの事故が発生した場合、外部への影響を軽減する方策や対応について検討した。

短絡事故時の対応としては、超電導ケーブルに短絡電流が通過した際に発生する圧力を低減する方策を検討した。第3章の 31.5kA/2sec 時のシミュレーションでは、最大圧力が 3MPaG に達する結果となったが、コルゲート管の弾性限界である 2MPaG を以下に圧力を抑える必要がある。圧力を低減する方策として、リザーバタンクのガス体積を大きくすることで圧力を抑制できることを見出し、実際にガス体積が 10000L であれば 2MPaG 以下に圧力が抑えられ、本方策が有効であることを示した。

また、早期の再送電には、短絡電流を即座に遮断することが有効であり、各短絡電流において即時再送電が可能な遮断時間を計算により求め、実用されている遮断器で対応できることを示した。

地絡事故時の対応としては、マンホールに液体窒素が漏洩する場合の影響検討を行い、66kV 級の実際のマンホールで液体窒素の漏洩をシミュレーションし、内圧が 0.3MPaG に達するには約5分かかることが判り、マンホールのふたが飛散するのではなく、持ち上がり圧力を逃がすような現象になることが判った。一方、地絡によって断熱管が貫通しないケースでは、地絡エネルギーにより内部の液体窒素がガス化し、破裂する危険性が危惧されたが、シミュレーションの結果、圧力上昇は 1.8MPa 程度であり、断熱管が破裂しないレベルであった。また、長手方向の圧力伝播も 10m ほどで、1/18 に圧力が低減するので、事故点近傍に影響が限定されることが判った。従って、検討した範囲内では、超電導ケーブルで地絡事故が発生しても公衆災害に繋がらないことを示すことができた。

本研究では超電導ケーブルの実用化に向けて事故時の安全性確保に関して焦点を当て、各種試験、シミュレーション、考察を行い、事故時の現象把握とその対策案を示した。現在、世界各国で超電導ケーブルの実証試験が実施されているが、この安全性に対する課題に対して十分な検討や検証を行っている研究機関は少なく、本研究成果が超電導ケーブルの実用化の一助になれば幸いである。