275kV-HTS ケーブルの地絡事故対策と模擬試験

Protection against the ground fault for 275 kV HTS cable and the experiment

高木 智洋, 八木 正史(古河電工);芹澤 正弘, 中野 哲太郎, 三村 智男(東京電力 HD)
TAKAGI Tomohiro, YAGI Masashi (FURUKAWA Electric);
SERIZAWA Masahiro, NAKANO Tetsutaro, MIMURA Tomoo (TEPCO HD)
E-mail: tomohiro.takagi@furukawaelectric.com

1. はじめに

2014 年度より始まった NEDO プロジェクト「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」は 2016 年 7 月に新プロジェクト「高温超電導実用化促進技術開発」の一部「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」に統合され、現在も開発が継続されている。古河電工は本プロジェクトで 275kV 高温超電導ケーブルの実用化研究を担当し、その一環として高温超電導(HTS)ケーブルにおける地絡事故に関する研究を行ってきた。

HTS ケーブルはケーブルコアを真空断熱管に納めた構造をとり、断熱管内部に液体窒素などの冷媒を循環させることでケーブルコアを極低温に冷却する[1]。275kV ケーブルでは1つの真空断熱管に1本のケーブルコアを収納する構成が想定されている。この断熱管、および変動磁場を打ち消すためケーブルコア外周に設けられるシールド層が接地電位に接続されており、このシールド層と導体層とを隔てる絶縁層に異常が生じると、最大 225kV の電圧が印加されて放電する地絡事故が発生する。

本研究では HTS ケーブルの短尺試料を作製し、これに人工地絡点を設けて大電流通電を行う地絡模擬試験を行った。さらにその結果から HTS ケーブルにおける地絡対策の意義を検討し、地絡対策の有効性を実験的に確認した。本発表でその詳細について報告する。

2. 実験方法

HTS ケーブルコアと真空断熱管を 1m ほどの長さに切断し、断熱内管の一端に底を付けて封じる。これを立てて断熱管内部に液体窒素を注入すれば、ケーブルコアを極低温に冷却することができる。冷却されたケーブルコアは、事前に側面の1か所に穴が開けられてそこに鉄ピンが挿入されている。上端部でコア内部の導体層と外周のシールド層が電極を介して電源に接続され、この間に大電流が通電されると、比較的抵抗の高い鉄ピンで大きなジュール熱が生じる。鉄ピンはすぐに蒸発し、その後はアーク放電によって人工地絡点での大電流通電が継続される。アーク放電はさらに巨大なエネルギーを解放し、周囲に破壊的なダメージをもたらすことになる。これが縦置き型短尺ケーブル試料による地絡模擬実験である。

模擬電流は AC50Hz で3サイクル分、60 ミリ秒間通電した。これは送電系統において地絡の発生を検出した後、主遮断器が起動して送電線への送電を停止するのに要するとされる時間である。通電は電流制御モードで行い、所定の交流通電を維持する電圧が電源により印加される。アーク放電はケーブルコアのシールド層と断熱内管、さらには断熱外管に飛ぶ可能性があるため、これら3つの導電体に電極を取り付け、電源に接続した。そしてそれぞれの経路に電流計を取り付け、各経路の電流挙動を測定した。

3. 結果と考察

まずは保護を施されていない試料に対して、AC10kA の地絡模擬通電試験を行った。通電開始 1 ミリ秒後に電圧が急増し、鉄ピンの通電からアーク放電に切り替わった。そして 10 ミリ秒、すなわち交流半サイクルの間に3つの電流経路すべてに電流が流れた。アーク電圧は 0.5~1kV、3サイクルで解放されたエネルギーはおよそ 0.3MJ であった。試験後の試料を解体したところ、ケーブルコアは著しく損傷しており、外/内両断熱管とも大きな穴が開いていた。

地絡事故が生じた時点でそのケーブルは既に再利用不可能であり、ケーブル自体を地絡から保護することにはあまり意味がない。しかし HTS ケーブルは洞道内に他のケーブル類と近接して敷設されることが想定されており、事故がその周辺に悪影響を及ぼす事態は避けたい。ここで仮に HTS ケーブルの最外周に位置する断熱外管の健全性が維持されれば、地絡事故が周囲に悪影響を及ぼさないことが保証される。そこで断熱外管の健全性維持を目的として、断熱内管の外周に保護層を設けたケーブル試料に対して同様の地絡模擬試験を実施した。断熱管の損傷がアーク放電の熱によるものに見えたため、保護層はアーク放電の遮断を目的として絶縁性不織布の積層構造とした。

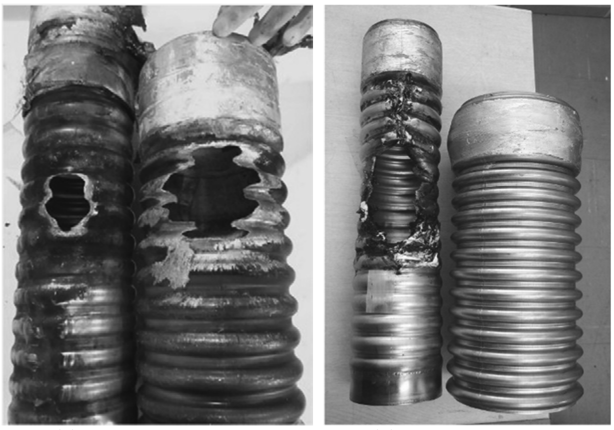
保護層を設けた試料に対して AC20kA の地絡模擬通電を行った結果、外管に地絡電流は流れず、内管は激しく損傷した一方で外管の健全性は維持された。この結果から、内管外周の保護層が HTS ケーブルの地絡事故に対して有効な対策であることが示された。

4. 結論

275kV-HTS ケーブルの地絡事故を模擬する通電実験を行った。従来構造の試料ではケーブルコア・断熱管共に著しく損傷したが、断熱内管外周に保護層を設けた試料では外管の健全性は維持された。この結果から、内管外周の保護層が HTS ケーブルの地絡事故に有効であることが示された。

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の補助事業の一環として実施されたものである。

5. 図表



(a) Without protection (b) With protection

Fig.1 Damaged pipes with the arc discharge.

参考文献

[1] S. Mukoyama, et al.: "Status of a 275 kV Class REBCO Superconducting Cable Development," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, June 2013, Art. No. 5402804

66kV 級 40mHTS ケーブルの短絡試験と冷媒挙動解析の比較
Comparison of Simulations and Experimental Results of 66kV HTS Cable in Short-circuit Current Accidents

堀田 大智, 竹田 夏子, 横尾 祐輔, 我妻 洸, 石山 敦士 (早稲田大学);
森村 俊也, 増田 孝人 (住友電工); 三村 智男 (東京電力)
Daichi Horita, Natsuko Takeda, Yusuke Yokoo, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama (Waseda University);
Toshiya Morimura, Takato Masuda (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);
Tomoo Mimura (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

1. はじめに

高温超電導ケーブルは，従来のケーブルに比べ高密度かつ低損失な電力輸送が行えると考えられ，安定的・効率的なエネルギーシステムの実現への解決策として期待されている。しかし，実用化のためには短絡事故電流通過時における安全性評価が必要である。そこで我々は，66kV 系統の短絡事故時において，冷媒である液体窒素の挙動解析を行ってきた(1,2)。日本国内の 66kV 系統では最大で 31.5kA－2.0s の短絡電流が想定されている。本研究では，40m の高温超電導モデルケーブルを解析対象とし，31.5kA－2.0s と等価エネルギーとなる電流条件 16kA－8.4s で実施した短絡事故模擬試験(3)と，解析結果の比較を行ったので報告する。

2. モデルケーブルの解析条件

本研究で対象とする高温超電導モデルケーブルは，三心一括型構造を取り，コルゲート管内に挿入されている。短絡電流通過時を考えているため，解析においては，銅フォーマ/HTS 導体層，HTS シールド層/銅シールド層をそれぞれ銅層一層の導体層，シールド層と仮定して，以下の式に基づく長手方向一次元の非線形熱伝導方程式に基づき有限要素法によりケーブルコアの温度を数値計算した。また、ケーブルコアからの熱伝達と外部からの侵入熱により冷媒温度を計算した。

$$\rho_{cu}c_{cu}\frac{\partial T}{\partial t}=k_{cu}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+Q_{in}-Q_{out}$$

Q_{in}: 流入熱量　Q_{out}: 流出熱量

3. 解析と模擬試験結果の比較

図 1 にケーブル入口から 30m 地点の冷媒温度，図 2 に 40m 地点の冷媒圧力に関する解析結果及び模擬試験結果の比較を示す。図 1 から，温度に関しては試験結果を解析結果で再現できていることが分かるが，図 2 から圧力に関しては再現できていないことが分かる。このことから冷媒圧力に関して，解析コードの改良が必要だと分かる。試験結果を見ると，冷媒圧力は急激に上昇した後，下降していることが分かる。今回の解析では、ケーブル線材隙間にしみ込んだ冷媒を考慮していないが、このしみ込んだ冷媒が気化することで急激に圧力が上昇し，それが再凝縮することで圧力が下降しているのだと考えている。したがって今後は，この仮説を解析コードに組み込むことで試験結果の再現を目指していく予定である。

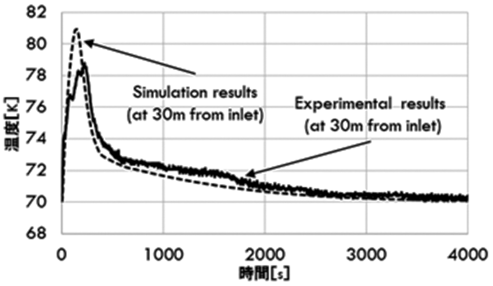


Fig.1 Comparison of Tested and Simulated LN_2 temperatures

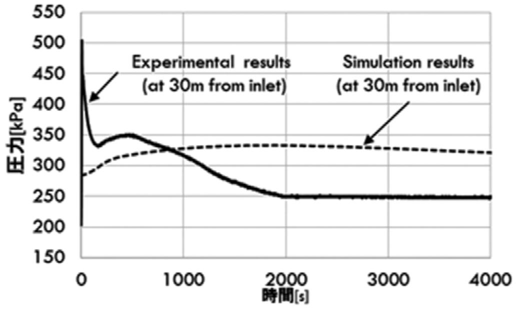


Fig.2 Comparison of Tested and Simulated LN_2 pressures

謝辞

本研究は,「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環として NEDO の助成により実施した。

参考文献

(1) T. Yasui, Y. Sato, K. Agatsuma, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 3, Apr. 2016, Art. no. 5402005.
(2) N. Takeda, T. Yasui, Y. Yokoo, K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.93(2016)p.135
(3) T. Morimura T. Minamino, T. Masuda et al.: 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, Kanazawa, 2B-p04

石狩プロジェクトでの断熱 2 重管での輻射と熱伝導による熱侵入の分離

Heat Leak Separation of Radiation and Thermal Conduction of Cryogenic pipe in Ishikari Project

山口 作太郎, 渡邉 裕文, イワノフ ユーリ, 筑本 知子, 神田 昌枝, 井上 徳之, 高野廣久（中部大）
YAMAGUCHI Sataro, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, KANDA Masae, INOUE Tokuyuki, TAKANO Hirohisa (Chubu Univ.)
E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

石狩プロジェクトでは断熱 2 重管は液体窒素循環のために、一つの外管に内に 2 本の内管を入れている。一本には超電導ケーブルを挿入し、もう一本は冷媒のリターンに用いている。断熱 2 重管は 2 種類の設計を行い、両者で熱侵入量の比較を行っている。また、曲がり部では直線部とは異なった設計を行っている。

断熱 2 重管での熱侵入の物理プロセスは主に2つあり、一つは輻射であり、もう一つは熱伝導である。前者は多層断熱材(MLI)を低温配管に巻いて熱侵入量の低減を図っている。後者は内管を力学的に支持する構造材を通じて入ってくるので、熱伝導率の低いGFRPを用いている。したがって、熱侵入量低減対策はこの２つではかなり異なる。このため、低熱侵入断熱2重管の開発を行うためには、どちらのプロセスが主な熱侵入であるかを知ることは、今後の断熱 2 重管開発のためには必要になる。

本講演では、石狩回線2で測定された熱侵入量データを利用して数学モデルから、それぞれの構造での輻射と熱伝導による熱侵入量の分離を試みた。

2. 断熱 2 重管構造と熱侵入量

石狩プロジェクト回線2では異なった構造の断熱 2 重管を使った [1]。構造は、一つは輻射シールド(Radiation Shield, RS)を使い、ケーブル管をリターン管に熱的に接続したアルミ製の RS で覆うような構造にしている。もう一つは 2 本の内管を RS なしで配置している。

Table 1 には外気温が異なったときの断熱 2 重管の熱侵入量が誤差評価を入れて示した。Part 1 は RS が組み込まれ、ケーブル管の熱侵入量は極めて低い。Part 2 は曲がり部を含んでいて、直線部である Part 3 に比べて熱侵入量は大きい。そして、Part 3 は RS を組み込まない構造である。回線2は地上に設置してあるために、外気温によって外管温度が夏季と冬季で異なる。このため、外気温によって熱侵入量は変わる。尚、この表では比較的温度が安定する夜間のデータを元に熱侵入量をまとめた。

3. 数学モデルと計算結果

断熱 2 重管の真空度は全体に渡って 10^-4 Pa のオーダーであるため、主な熱侵入プロセスは輻射と熱伝導である。このため、熱侵入の数学モデルとして下式を仮定した。

$$A \times (Text \wedge 4 - 77 \wedge 4) + B \times (Text - 77) = HeatLeak(Text)$$

ここで *Text* は外管温度を表す。左辺第1項は輻射による熱侵入量を示し、Stefan-Boltzmann 法則から温度の4乗に比例する。第2項は熱伝導による熱侵入量を示し、これは温度差によって熱侵入量が決まるモデルである。尚、低温側温度は 77K としている。この方程式の未知数は A, B の2つであり、Table 1 では2つの外管温度での熱侵入量が分かっているので、原理的に A, B は数値的に求めることができる。但し、物理的には A, B は共に正値でないと行けない。

Table 2 に Part 1 & Part 3 の計算結果の例を示す。計算を行ったときの温度は表内に示した値である。Table 1 とは平均値が少し違うが、大きな違いをもたらさない。また、熱侵入量については、誤差が得られているので、その範囲で計算を行った。また、熱侵入量は前に書いてある値が輻射分であり、後の値が熱伝導分である。×印は熱伝導分が負値になった場合である。結果としては、外気温が低温時には熱侵入量が高い側で外気温が高い場合には熱侵入量が低い側で A, B 共に正値が得られている。そして、Part 1 では輻射が主であり、Part 3 では熱伝導が主な熱侵入プロセスになっている結果となった。

Table 2 Heat leaks by Radiation and Thermal conduction in Ishikari Line 2

Part 1		Low Temp. 270.6 [K]		
	[W/m]	ave. − s	ave. of HL	ave. + s
High Temp 290.4 [K]	ave. − σ	×	×	0.727, 0.188
	ave. of HL	×	×	×
	ave. + s	×	×	×
Part 3		**Low Temp. 270.6 [K]**		
	[W/m]	ave. − s	ave. of HL	ave. + s
High Temp 290.4 [K]	ave. − σ	0.958, 0.199	0.641, 0.581	0.324, 0.963
	ave. of HL	×	0.919, 0.303	0.603, 0.684
	ave. + s	×	×	0.881, 0.406

本研究は経済産業省 委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」、「高温超伝導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 助成事業「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」により実施された。

参考文献

1. S. Yamaguchi et al, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, Vol. 25, pp. 1-4 (2015).

Table1 Heat leaks of cryogenic pipes in Ishikari Line 2

Temp. of outer pipe	270.75±2.7 [K]			290.55±2.6 [K]		
Part	Cable pipe [W/m]	Return pipe [W/m]	Sum of two pipes [W/m]	Cable pipe [W/m]	Return pipe [W/m]	Sum of two pipes [W/m]
1	0.033±0.035	0.832±0.036	0.865±0.050	0.024±0.034	1.204±0.038	1.228±0.051
2	0.92±0.13	0.51±0.14	1.42±0.19	1.34±0.13	0.63±0.17	1.96±0.21
3	0.79±0.45	0.431±0.046	1.222±0.065	1.021±0.045	0.535±0.063	1.556±0.077

1000m 級超電導直流ケーブルシステムのケーブルコア熱挙動特性
Thermomechanical characteristics of cable core for 1000-meter superconducting cable system

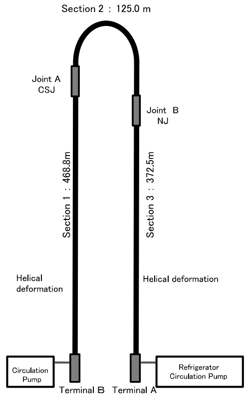
筑本 知子, 渡邉 裕文, ユーリ・イワノフ, 高野 廣久, 岩田 暢祐, 山口 作太郎（中部大, I-SPOT）;
石山 功太郎, 大石 前次(千代田化, I-SPOT);渡部 充彦, 増田 孝人(住友電工, I-SPOT)
CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, TAKANO Hirohisa, IWATA Yosuke,
YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ., I-SPOT); ISHIYAMA Kotaro, OISHI Zenji (Chiyoda Corp., I-SPOT);
WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Ind., Ltd., I-SPOT)
E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

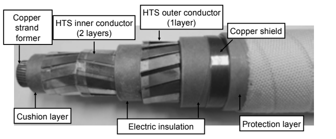
1. はじめに

超電導直流ケーブルシステムの実用化において重要な課題の一つは、冷却・昇温時のケーブルコアの熱応力対策である。例えば 0 ℃から液体窒素温度まで冷却する場合には、0.3 %程度の熱収縮が見込まれ、それにより端末固定部のケーブルコアの軸方向に大きな張力がかかる。従ってこれによるケーブルの劣化を防ぐため、許容張力以下に抑える対策が必要である。中部大学の 200 m システムでは可動式端末容器にて対応したが、石狩においては、これに加え、ヘリカル変形を実施した [2,3]。ヘリカル変形とは、ケーブルコアを管路に敷設後、一旦液体窒素にて冷却、熱収縮させた状態で両端固定後、昇温伸長させる方法で、伸長の過程でケーブルコアが自発的にヘリカル（螺旋）状に変形する性質 [4] を利用することにより、熱収縮分の余長をケーブル長全体にわたり稼ぐ方法である。これまで 500 m 及び 1000 m のシステムにおいて 2 回の冷却試験を実施しているが、いずれの場合も熱応力の大部分をヘリカル変形にて吸収できている。本報告では、1000 m のシステムにおいて 2016 年 7 月～12 月にかけて行った二回目の冷却試験における軸張力の変化等についてまとめた結果を紹介する。

2. 1000 m システムの概要

システムのレイアウト、ケーブルコアの構成と仕様を Fig.1 に示す。図に示す各距離は断熱二重管長である。本システムはジョイント A、B の二つの接続部を有し、前者は配管に対してコアを固定するコアストップジョイント（CSJ）、後者は固定しないノーマルジョイント(NJ)となっている。またヘリカル変形は Section 1、3 の直線部について実施した。ケーブルコアは端末容器およびジョイント部にてフォーマーを把持・固定している。端末容器の把持部にロードセルを取付け軸張力の測定を行った。また端末容器は前述のように前後に移動できるように なっており、可動距離は 500mm である。





	Specification of Cable Core
Former	Cu strand(130 sq)
HTS-tape	DI-BSCCO Inner:TypeHT-CA (12+12) Outer:New TypeHT-CA(15)
Insulation layer	PPLP, thickness 2mm
Cupper shield	Cu-tape, 100 μm
Outer diameter	40mm
Weight	2.6kg/m

Fig. 1 Specification of 1000 system

3. 冷却試験

Fig.2 に冷却前の Section 1の端末 B 側で撮影したケーブルコアの X 線写真（縦断面方向）を示す。同様の測定は数カ所で行っており、いずれも、ヘリカル変形しているのが確認され、その周期は 1250～1500mm であった。なお、周期が 1250mm でコアがケーブル管に接していると仮定すると、ケーブル管の内径 72.1mm、コア直径 40mm より、0.32%の熱収縮を吸収できると計算される。

Fig.3 に冷却時のケーブル配管の温度変化とケーブルコアの軸張力変化をまとめる。図中の縦線は午前 0 時を示す。冷却は端末 B 側から実施し、2 日間の窒素ガスフロー冷却（～110K）後、液体窒素を注入した。温度変化とともに張力は増大し、LN_2注入時に急激に変化した。その際、ケーブルの許容張力より定めた管理値（端末 A 側：600kgf、B 側：1000kgf）以下になるように端末移動した（図中矢印）。移動量の合計は A 側は約 347mm、B 側は約 319mm である。その後、張力は昼夜で若干の変動はあるものの、一定範囲内の値に落ち着いた。この張力の変動は外管温度変化に追随しており、これは本システムが U 字状の線路でかつ U 字部を固定していないため、温度変化による外管の伸び縮みにより U 字部と端末間距離が変化するためと考えられる。以上のように、本試験結果より、ヘリカル変形と端末移動によって、許容張力以下に抑制できることが確認できた。

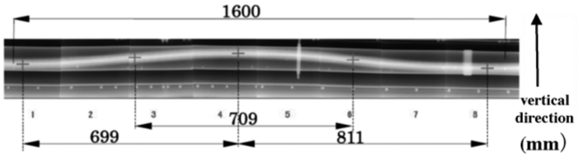


Fig.2 Typical X-ray photograph close to terminal B, showing helical deformation of cable core.

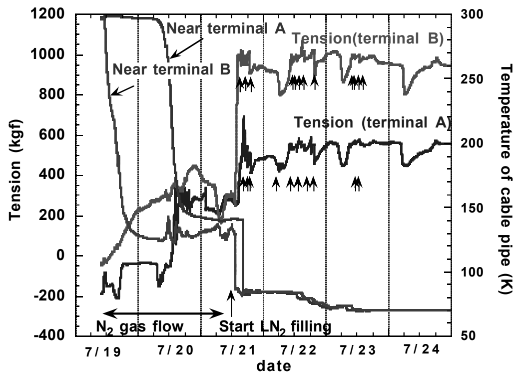


Fig.3 Cable pipe temperature and tension change during cooling process from room temperature to LN_2 temperature. The arrows show the time when the terminals were moved.

謝辞 本研究は経済産業省の委託及び NEDO の助成により実施された。

参考文献

1. S. Yamaguchi et al., Proc. of ICEC24-ICMC2012 (2013) 1041.
2. S. Yamaguchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 25 (2015) 5402504.
3. N. Chikumoto et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 5402204.
4. H. Watanabe et al., Proc. of ICEC24-ICMC2012 (2013) pp.711.

1000m 級超電導直流ケーブルシステムの冷却循環試験

Cooling and circulation experiment of the 1000m class superconducting DC power transmission system in Ishikari

渡邉 裕文, イワノフ ユーリ, 筑本 知子, 山口 作太郎(中部大);
石山 功太郎, 大石 前次(千代田化工); 渡部 充彦, 増田 孝人(住友電工)
WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.);
ISHIYAMA Kotarou, OISHI Zenji (Chiyoda Corp.);
WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: h_watanabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

石狩プロジェクト(石狩 PJ)では太陽光発電所とインターネットデータセンターを結ぶ 500m の超電導直流送電システム(回線1)と、将来の長距離化に向けた技術的課題の抽出のために用いる 1000m の超電導直流送電システム(回線2)を建設した[1,2]。本講演では、石狩 PJ の回線2の冷却・循環システムを紹介すると共に、2016 年 7 月から 12 月にかけて行った二回目の冷却循環試験における熱侵入量測定及び圧力損失測定などの冷却及び循環に関わる試験の結果について報告する。

2. 回線2冷却・循環システムの概要

Fig.1 に回線2の冷却・循環システムの概要図を示す。TB はターボブレイトン冷凍機、ST はスターリング冷凍機を示す。冷凍能力の仕様はターボブレイトン冷凍機は 2kW 以上@66K、スターリング冷凍機は 1kW 以上@77K である。CP は循環ポンプを示し、冷凍機システム側に二台(CP1,2)、中間の端末 B 側に一台(CP3)備えられている。RV はリザーバーを示し 2m^3 の容量を持ち、システム全体の圧力調整機能を持つ。H はヒーターを示し、冷却システム単独試験時に熱負荷として用いる。測定機器については、FM はコリオリ型流量計、T で始まるラベルは温度測定、P で始まるものは圧力測定を示す。

通常の運用ではターボブレイトン冷凍機を通った液体窒素はケーブル側に向かい、スターリング冷凍機を通った液体窒素は直接リザーバーに戻るように循環させるが、2016 年度の冷却試験ではスターリング冷凍機側は使用せず、ターボブレイトン冷凍機側のみ用いた。リザーバーから出た液体窒素は CP1 又は CP2 で加圧された後、ターボブレイトン冷凍機一台又は二台により冷却される。TB1、TB2 の内、使用しないものはバルブ操作により迂回される。液体窒素は FM1 で質量流量を測定された後、端末に向かい、ケーブル側を循環した液体窒素はリザーバーに戻る。CP1、CP2、CP3 は当初全てターボ型ポンプであったが、今回の試験の途中から試験のために CP2 のみ容積型のポンプに置き換えた。

Fig.2 に断熱配管の模式図を示す。ケーブルを収める断熱配管はケーブルの接続部で区間1、区間2、区間3と分けられる。断熱配管は液体窒素循環のために一本の外管の中に二本の内管を持っている。従って、ケーブルの長さは約 1000m であるが、液体窒素はその距離を往復するため、循環距離は約 2000m である。ケーブルを収める配管をケーブル管と呼び、液体窒素をリザーバーに返すための配管をリターン管と呼ぶ。区間1では輻射シールド付き断熱配管を採用し、区間2、3はシールドなしの断熱配管を採用した[3]。区間2には半径 7m、180 度の曲がり管の区間がある。

3. 冷却・循環試験

液体窒素の温度上昇と、液体窒素流量から熱侵入量を評価した。端末を含むケーブルシステム全体への熱侵入量は試験時の外管温度-2.4℃と 17.4℃で、それぞれ 1.746(20)kW と 2.091(22)kW だった。特に、区間1のシールド付き断熱配管では熱侵入の大部分は輻射シールドで取り除かれるため、ケーブル管への熱侵入量は 0.0634(59)W/m であった。これは 40L/min で循環させた場合、20km で 1.1K 程度の液体窒素の温度上昇に対応する。

液体窒素循環による圧力損失はポンプの容量及び循環距離に影響を与える。循環流量を 15L/min から 36L/min の範囲で変化させ、圧力計で測定した各所の液体窒素圧力から圧力損失を評価した。流量と共に圧力損失は増加したが、流量 36.03L/min においてケーブル側全体で 42.80kPa、冷凍機システム側も含めたシステム全体で 98.4kPa であった。

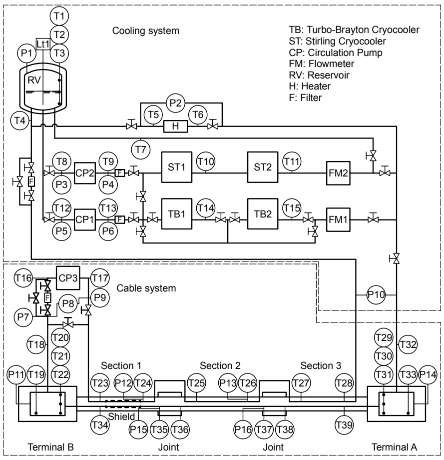


Fig.1 The piping and instrument diagram of Line 2.

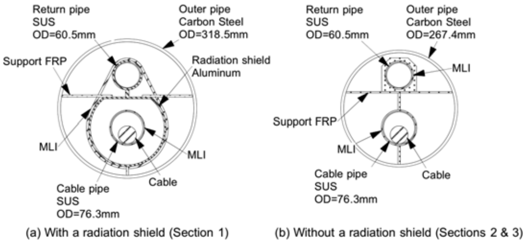


Fig.2 Schematic cross sections of cryogenic pipes.

謝辞

本研究は経済産業省　委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」、「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」、国立研究開発法人　新エネルギー・産業技術総合開発機構　助成事業「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」により行われた。

参考文献

1. S. Yamaguchi et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.23
2. N. Chikumoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.29
3. H. Watanabe et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 89 (2014) p.39.