インバー合金の新しい展開

インバー線の架空送電線への応用

鈴木 和 素*

1. ま え が き

近年、都市部の過密化が進むにつれて、特に大都市近郊での電力需要が増加している。山間部の水力発電所や遠隔地の原子力発電所で作られた電気は、鋼心をテンションメンバーとしてその上にアルミ導体を撚り合わせた鋼心アルミより線 (ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced) を用いた架空送電線によって運ばれて来るが、都市近郊の宅地化に伴う用地難や地価高騰により、新たな架空送電線路を確保することは非常に困難になってきている。

このような状況下においては既設の送電線路設備を利用した増容量対策が望ましく、この為には導体の耐熱性を向上させて許容電流を増大させる方法が有効である。しかし、図1に示すように、この場合、電線の使用温度が上昇することから電線の弛度(電線の弛み)が増加し、必要な地上高が確保できなくなる。

電線の弛度を抑制する方法としては、①構造或いは工法に工夫を加えるもの、②心材に線膨張係数の小さなものを用いる方法がある。①の代表的なものにギャップ型電線があり、これは導体であるアルミ層と鋼心の間にギャップを設けた特殊な構造を有し、アルミに比べて線膨張係数の小さい鋼心のみに常に張力を分担させる方法であり、把持方法や延線方法に特殊な技術を必要とする。また、鋼心自身の線膨張係数も比較的大きいことから、同一弛度とした場合、ギャップ型電線の送電容量は標準 ACSR に比べ1.75倍程度である⁽¹⁾。そこで、②の方法として、線膨張係数の小さなインバー合金線

図1 架空送電線の弛度。

を ACSR のテンションメンバーとして用いることが注目され、高強度・高靱性化と高耐食化が図られた。その結果、現在では、分散強化型耐熱 Al-Zr 合金線と組合せたアルミ覆インバー心特別耐熱アルミ合金撚線(XT Aluminum Conductor Invar Reinforced, 以下 XTACIR と記す)や亜鉛めっきインバー心超耐熱アルミ合金撚線(ZT Aluminum Conductor Invar Reinforced, 以下 ZTACIR と記す)が用いられている。これらは、従来の ACSR と質量、外径がほぼ同一の構造で、電線温度が上昇しても通常の ACSR と同一の弛度レベルを維持することができ、送電容量を2倍に増加させた増容量架空送電線である⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では送電線用テンションメンバーとしての要求特性とインバー合金の高強度・高靱性化、高耐食化の方法ならびにインバー合金線を用いたインバー電線について紹介する。本章では簡単のためにインバー線と呼ぶことにする。

* 株式会社フジクラ基盤材料研究所金属材料開発部部長代理(〒135 東京都江東区木場1-5-1)

Application of Invar Wire to Over Head Transmission Line; Kazumoto Suzuki(Metallic Materials Department Materials Research Laboratory, Fujikura Ltd., Tokyo)

Keywords: invar wire, over head transmission line, torsion, tensile strength, drawing, sag, steel tower

1997年6月9日受理

2. インバー線の要求特性

風雪や気温変動など厳しい自然環境に曝される架空送電線は長期間に渡る信頼性が重要であることから、基本特性は従来材と比べ同等以上とした上で新たな付加機能が要求される。

すなわち、ACSR用テンションメンバーとして用いられるためには、従来からACSRに用いられている亜鉛めっき鋼線(GS線：Galvanized steel wire)とアルミ覆鋼線(AC線：Aluminum clad steel wire)並の機械的特性を有した上で弛度抑制のための低線膨張特性を示さなければならない。

ACSR用テンションメンバーとして用いられるためには、まず引張強さが十分大きく、かつ、信頼性上、伸びも大きくなければならない。また、電線として燃られるために良好な捻回特性や自己径または2倍径での巻き付け巻き戻し特性が要求され、風などにより長期間に渡り振動を受けることから振動疲労特性も重要視される。さらに、耐熱アルミ合金導体と燃り合わせて使われるために耐腐食性の観点から亜鉛めっきを施したり、より高い耐熱性が要求される場合にはアルミ被覆が施される。

従来からACSR用に用いられている亜鉛めっき鋼線およびアルミ覆鋼線と比較して亜鉛めっきインバー線およびアルミ覆インバー線の代表的諸元を表1に示す⁽¹⁾。

3. 高強度インバー線の開発

(1) 強度特性

従来から精密機器などに用いられていたインバー合金は強加工しても引張強さは高々785～880MPaであり、ACSR用テンションメンバーとしては強度不足である。

インバー型合金の高強度化については従来からTi添加に

表1 インバー線の代表的諸元。

特性 単位	直 径	引張強さ	弾性係数	線膨張係数	
鋼線	10 ⁻³ m	MPa	GPa	10 ⁻⁶ K ⁻¹	比率*
亜鉛めっき インバー線	3.2	1080	162	2.8	0.24
	4.2	1030	〃	〃	〃
アルミ覆 インバー線	3.0	1030	152	3.7	0.32
	4.3	932	〃	〃	〃
亜鉛めっき 鋼線 (参考)	3.2	1270	206	11.5	1.0
	4.2	1230	〃	〃	〃
アルミ覆 鋼線** (参考)	3.2	1270	149	12.9	1.12
	4.2	1270	149	12.9	1.12

*：亜鉛めっき鋼線に対する比率。

**：アルミ被覆鋼線は23%IACSアルミ覆鋼線(23AC)を示す。

よる時効硬化型合金があったが、溶体化処理、時効という複雑な工程が必要な上、時効温度がAlの融点近傍であり、Al被覆材には不適當であることや時効硬化型合金は加工性が悪く、そのままではACSR用テンションメンバーとしては適用できない。

そこで、Fe-Ni合金をベースに添加元素や加工・熱処理条件が検討された。まず、靱性を劣化させない範囲で固溶強化のためにCを添加し、低線膨張の為にCoを添加した。また、MoはCと結合してMoCを形成することから、これを適当な熱処理によりMoCとして微細に分散させることによって強度向上が図られた。表2に高強度インバー線の化学組成を示す⁽⁴⁾。図2は高強度インバー線の熱処理後の金属組織であるが、約1μmの大きさのMoCが微細に分散しているのが認められる⁽⁵⁾。

(2) 捻回特性

ACSR用テンションメンバーとしての使用に耐える為に最も大切なことは捻回特性の向上である。

高強度インバー線の捻回変形の様相を模式的に図3に示す。なお、掴み間隔は線径の100倍である。

変形は先ず(a)に示すように3～4回の均一捻回が掴み間の試料片全体に渡って生じ、その後任意の一点より(b)に示すような1回目の局部捻回が発生して伝播して行き、Aの部分全域が変形完了後は逆方向のB部へ伝わって行く。このように掴み間全長で1回目の局部捻回が完了したときの捻回値は50～60回を示す。次に(c)に示すように2回目の局部捻回が主として掴み端部より発生し伝播する。この2回目の局部捻回が試料片全長に渡って伝播すると捻回値は100

表2 インバー線の組成。

(質量%)

C	Si	Mn	Ni	Mo	Co	Fe
0.31～0.45	<0.5	<1.0	30～45	0.5～4.5	1～10	bal.

図2 熱処理後のインバー線の微細組織。(×1000)

回以上になる⁽⁵⁾。

当初は、組成と熱処理方法で捻回値の改善を試みたが、十分な捻回特性を達成できなかった。

そこで、インバー線の伸線加工方法、主としてダイス角度と捻回特性との関係について検討した。標準的なダイス(高角度ダイス)で伸線加工すると、試料横断面の硬度分布は

(a) 均一捻回

(b) 1回目の局部捻回

(c) 2回目の局部捻回

図3 インバー線の捻回形態。

図4 インバー線横断面の硬度分布。

図5 インバー線の線膨張特性。

図4に示すようなM字型分布で、表面直下の硬度上昇が著しく、捻回値は精々4~5回である。一方、低角度ダイスを用いて伸線加工すると試料横断面の硬度分布はほぼ均一になり、捻回値は100回以上に向上する⁽⁶⁾。

(3) 線膨張特性

亜鉛めっきインバー線とアルミ覆インバー線の線膨張特性を、従来の亜鉛めっき鋼線と比較して図5に示す⁽¹⁾。

インバー電線に使用されているインバー線もインバー合金の例にもれず、低温側では通常の鋼線に対して1/3~1/4と非常に低い線膨張係数を持っているが、磁気遷移点温度以上では高い値になる。

(4) 耐熱性

図6に長時間軟化特性を示す。亜鉛めっきインバー線とアルミ覆インバー線は、それぞれ513 K, 563 Kでの 3.6×10^6 s加熱後も強度低下が殆どなく、高温長時間の加熱に対しても安定した耐熱性を示す。また、図7、8に示すように長時間加熱後も境界面に有害な合金層の生成もなく、亜鉛めっき層とアルミ層の耐熱性も十分である。

図6 インバー線の長時間軟化特性。

図7 高温加熱後の亜鉛めっき層横断面。(×200)

図8 高温加後熱のアルミ層横断面。(×100)

図9 インバー線の振動疲労特性.

(5) 疲労特性

中村式回転曲げ疲労試験機を用いて亜鉛めっきインバー線とアルミ覆インバー線の振動疲労特性を調べた結果を図9に示す。十分な疲労強度を有しており、特に問題の無いレベルである。

(6) 耐腐食性

前述のようにインバー電線は耐腐食性の観点から、一般にZTAIと撚り合わせる場合にはインバー線に熔融亜鉛めっきを施し、XTAIと撚り合わせる場合にはテープクラッド法または連続押し出し法によりアルミ被覆を施す。亜鉛めっきインバー線とアルミ覆インバー線の塩水噴霧試験および0.2%亜硫酸ガス腐食試験の結果を図10, 11に示す。強度低下は殆どなく、良い耐腐食性を示している。

4. インバー電線の特性

(1) インバー電線の構成と性能

XTACIRとZTACIRの構成と性能例を表3に示す⁽⁷⁾。また、代表例としてXTACIR 320 mm²とZTACIR 410 mm²の横断面を図12と図13に示す。

図10 塩水噴霧試験後の強度残存率.

図11 0.2%亜硫酸ガス試験後の強度残存率.

電線外径、質量、引張荷重は標準のACSRとほぼ同じで、連続許容温度はZTACIRが483 K、XTACIRが503 Kと高く、どちらも従来のACSRの最大連続負荷時と同一弛度で送電容量を約2倍に増加させることができる。

(2) 温度-弛度特性

インバー電線と通常のACSRを架線して通電することにより、電線温度と弛度との関係について調べた結果を図14に示す。363 K前後から線膨張によってアルミ部の張力分担がゼロになり、鋼心に全架線張力が掛かるようになると、インバー心の低線膨張特性により、インバー電線は通常のACSRに比べて弛度増加が十分低く抑えられている。

5. 今後の展望

既設の送電線路設備を利用した増容量対策としてのインバー電線およびその構成素材の特性について紹介した。

インバー電線による増容量送電線は既に実用に供されているが、大都市周辺での電力負荷の増加に対して今後益々利用されるものと予想されている。また、低弛度架空送電線としての特性を更に向上させるために、インバー線のより一層の高強度化が要求されている。

表3 インバー電線の構成と性能.

電 線		XTACIR	ACSR	ZTACIR	ACSR	ZTACIR	ACSR
特 性							
公称断面積 (10^{-6} m^2)		320	330	160	160	410	410
電線構成 (本/ 10^{-3} m)	Al	24/SB	26/4.0	30/2.6	30/2.6	26/4.5	26/4.5
	St	7/3.8	7/3.1	7/2.6	7/2.6	7/3.5	7/3.5
電線外径 (10^{-3} m)		23.8	25.3	18.2	18.2	28.5	28.5
計算断面積 (10^{-6} m^2)	Al	309.1	326.8	159.3	159.3	413.4	413.4
	St	79.38	52.84	37.16	37.16	67.35	67.35
質量 (kg/km)		1418	1320	740.3	732.8	1687	1673
計算引張荷重 (GPa)		114	107	60	68	125	136
293 K 計算直流抵抗 ($10^{-3} \Omega/\text{m}$)		0.0924	0.0888	0.185	0.182	0.0714	0.0702
許容電流 (A)		1479	713	883	454	1675	830
連続許容温度 (K)		503	363	483	363	483	363

SB: Smoothed Body (圧縮導体) の意.

図12 XTACIR 320 mm² の横断面.

図14 XTACIR 320 mm² の弛度特性.

図13 ZTACIR 410 mm² の横断面.

文 献

- (1) 電気協同研究会: 電気協同研究, 43 No. 3(1988), 「送電用新種電線」.
- (2) 阿部一弥, 鈴木和素, 川上明男, 齊藤 隆, 長沼義裕, 大出 寛, 鴻巣宏三, 日田貴紀: 藤倉電線技報, 第69号(1985), 1.
- (3) 武田 薫, 鮫島正洋, 阿部一弥, 高山輝之, 大出 寛, 西野祥昌: 藤倉電線技報, 第81号(1991), 28.
- (4) 神鋼鋼線株式会社: 特開昭59-116359.
- (5) K. Hamada, Y. Yamaoka, H. Tubono and Y. Kawabata: WIRE JOURNAL INTERNATIONAL, April, (1988), 84.
- (6) 藤倉電線株式会社: 特開昭62-296909.
- (7) 長沼義裕, 吉村洋典, 日田貴紀: 電気学会研究会資料電線ケーブル研究会, EC-86-1, (1986).