PWMインバータ出力波形に対する 架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性

正員 関 秋生 正員 宮本 茂樹 (東海旅客鉄道株式会社)

正員 大木 義路 (早稲田大学)

非会員 久恒 豊一 非会員 小野 努 正員 佐久間 進 (古河電気工業株式会社)

Insulation Characteristics of XLPE Cables for High Frequency Voltage with PWM Inverter

Akio Seki, Member, Shigeki Miyamoto, Member (Central Japan Railway Company)

Yoshimichi Ohki, Member (Waseda University)

Toyokazu Hisatsune, Non-Member, Tsutomu Ono, Non-Member, Susumu Sakuma, Member (Furukawa Electric Co., Ltd.)

The development of feeding cables is being advanced for use in supplying power to propulsion coils with a view of realizing the Yamanashi experimental lines of superconducting magnetic levitation railway (Maglev). To the XLPE insulation of feeding cables, a step voltage waveform is applied by an inverter in which high frequencies are superimposed on the basic commercial frequency. The authors devised electrical testing equipment that can output such specific waveforms, and they investigated the effect of such waveforms on the insulation properties of XLPE cable, the breakdown characteristics of the model cables and their long-term characteristics. As a result, it was learned that the insulation breakdown depends on the voltage waveform peak value, and that the long-term characteristics are determined by the basic frequency. This knowledge will be useful for the insulation design of feeding cable system of Yamanashi experimental line.

キーワード：C Vケーブル、PWMインバータ、高周波、絶縁特性

1. まえがき

超電導磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道：superconducting magnetic levitation railway (Maglev)）の実用化を目指し、現在山梨に実験線の建設が進められている。本システムでは、地上に敷設される推進コイルに変電所から可変電圧、可変周波数の電力を供給することにより、列車の駆動、制御が行われる。山梨実験線で要求される仕様は、周波数が0～56.6Hz、電圧が0～22000Vであり、この機能を実現するために電源にはユニットインバータ4段からなるPWM (Pulse Width Modulation の略)インバータが、インバータから推進コイルまでの間の接続には架橋ポリエチレン絶縁 (C V) ケーブルが使用される。

一般に多重インバータの出力電圧波形は、図1に示すようなステップ電圧の合成波形となり、実際には、さらにスイッチングサージが重畳した波形となるため、より複雑な様相を示すことになる。これらの波形がC Vケーブルの絶縁特性に与える影響については不明な点が多く、き電線システムの合理的絶縁設計を行うにあたり、その解明が不可

欠であった。

筆者らは実波形模擬のPWM波形が出力可能な課電試験装置を設計製作し、モデルケーブルを用いて実波形に対する初期、長期の特性検証を行い、PWM波形がこの絶縁特性及び寿命特性に与える影響を検討した。

本論文はこれらの実験結果と評価、及びこれから得られるPWM波形に対するケーブルの絶縁設計評価手法について論じたものである。

2. き電線システムと問題点

〈2.1〉 給電方法概要 浮上式鉄道の推進コイルは図2に示すようにガイドウェイの両側面に取り付けられ、更に各コイル群はそれぞれ一定の長さに分けられて、き電区分開閉器を介してき電ケーブルにより変電所のインバータにつながっている。この一定の長さのコイル群をセクションと呼ぶが、実験線では各セクションは図3に示すようにガイドウェイ両側に半セクション長ずつずらして配置され、T分岐接続部を介してき電線に接続されている。

＜2・2＞ 適用ケーブル インバータ～推進コイルに至るまでのき電線には、図4に示すように中性線を加えた4心より合わせ型のC Vケーブルを適用する。

図1 PWM電圧波形
Fig.1 Waveform of PWM Voltage

図2 マグレブの推進コイル
Fig.2 Propulsion Coils for "Maglev"

図3 マグレブのき電線システム
Fig.3 Feeding Cable System for "Maglev"

図4 き電線の構造断面図
Fig. 4 Cross-sectional View of Feeding Cable

＜2・3＞ き電線システム印加波形の特徴 き電線システムに使用されるPWMインバータは、所要電圧の確保と低周波時のトランスの偏磁防止等のためにハーフブリッジまたはフルブリッジまたはその組み合わせで使用される。従ってき電線に加わる電圧は列車の走行状態で大きさと周波数が変化する。列車速度とインバータ出力波形の関係は図5⁽¹⁾のようになり、いずれの場合にも低周波成分にPWM制御のキャリア周波数に相当する高周波成分が重畳した波形となる。

これらの電圧波形の中では、波形そのものの厳しさという点では極性反転が繰り返される列車起動時の波形が厳しいが、電圧が高速運転時の値の1/8程度と低いため特に問題とはならず、電圧が最高になる高速運転時の波形が最も厳しい波形となる。

このことから、実験では高速運転時の波形である商用周波付近の基本波に高周波が重畳した波形に対するCVケーブル絶縁体の特性を調べることにした。

3.3図 起動時（ハーフブリッジのみ）

3.4図 低速時（ハーフブリッジ1段+フルブリッジ3段）

3.5図 中速時（ハーフブリッジ1段+フルブリッジ3段）

3.6図 中速時（フルブリッジ4段）

3.7図 高速時（フルブリッジ4段）

図5 列車の走行状態とPWMインバータ出力波形
Fig.5 Relationship between Waveform of PWM Inverter Voltage and Velocity of "Maglev"

3. 絶縁設計における問題点

き電線の絶縁設計を行うには印加波形の影響をどのように考慮するかが問題となる。一般に、CVケーブルの商用周波の正弦波電圧に対する絶縁厚設計は下式により行っている。すなわち

$$t_{AC} = \frac{E / \sqrt{3} \times K_1 \times K_2 \times K_3}{E_{L(AC)}}$$

ここで、E：常時回路最高電圧[kV]

K₁：温度係数

K₂：劣化係数（寿命指数nによる1時間と30年間の寿命換算指数）

K₃：不確定要素などに対する裕度

E_{L(AC)}：最低破壊電界[kV/mm]

ところが、図1に示す波形に対しては、波形と絶縁破壊電界の関係、波形と寿命との関係、すなわち設計に用いる定数E_L、K₂が未知であるため、必要絶縁厚を求めることができない。

しかし、波形を他の波形に近似あるいは変換して考えることにより、例えば以下のようないくつかの考え方が可能である。

[1] 周波数55Hz(*), 電圧ピーク値V₁の正弦波電圧。

(図6-1) 破壊電界、寿命とも波形の包絡線で決定されるという考え方。

(*) 山梨実験線電源基本周波数の代表値

[2] 周波数2.4kHz(*), 電圧ピーク値V₁の正弦波電圧（図6-2）。破壊電界、寿命とも重畳する高周波で決定されるという考え方。ただし常時ピーク値V₁に達する高周波に置き換えている点で絶縁厚を過剰評価してしまう可能性がある。

(*) 多段式PWMインバータの出力電圧に含まれる高周波のうち最も優勢な周波数は、

図6-1(Fig.6-1)

図6-2(Fig.6-2)

図6-3(Fig.6-3)

図6-4(Fig.6-4)

図6 PWM電圧波形の考え方

Fig. 6 Some Consideration of PWM Waveform

キャリア周波数×インバータ段数×アーム構成により決まる定数（フルブリッジの場合は2）で表される。従って、本論文で対象とするインバータの場合には、300Hz×4段×2=2400Hz、となる。

[3] 周波数55Hz、電圧ピーク値V₁の電圧と周波数2.4kHz、電圧ピーク値V₂の電圧の重ね合わせ（図6-3）であるという波形の構成に注目し、基本波に必要な絶縁厚とそれに重畳した高周波電圧に必要な絶縁厚の重ね合わせが成り立つとする考え方。

[4] 絶縁特性に重畳する高周波が影響するとすれば、その波形立ち上がり速度や電圧の反転回数が影響すると思われるため、この点に注目し、PWM波形を1周期中での電圧反転回数が等価な繰り返しパルスに置き換える。パルスをピーク値V₁に達する立ち上がり100μsec（2.4kHz半波相当）のサージに近似し、これがキャリア周波数最高500Hzに相当して半波毎に侵入する（1000回/sec）と考え、寿命期間中に印加されるサージの回数から、V-n特性を考慮して設計する考え方。（図6-4）

いずれも、PWM波形において商用周波電源波形の場合と等価的な電界はどのようにして与えられるのか、また、劣化係数を算出するにあたり、重畳する高調波の影響をどのように考慮したらよいのか、がポイントとなり、ケーブルの合理的な設計を行うにはこれらを実験的に知ることが必要となる。ここでは波形の近似性の点から可能性の高い[1]、[3]の考え方に対して実験的評価を行った。

4. モデルによるPWM波形に対する特性把握

<4.1> 実験に使用したPWM波形出力装置 実験に用いるPWM波形課電装置には、極力実際に近い電圧波形を得るため、実器と同じ4段フルブリッジ構成のインバータを採用した。基本回路構成を図7に示す。本装置は特殊インバータと特殊トランスから構成されており、出力電圧波形は直流電圧のさい断で得たステップ波形を4段合成したもので、最大55Hzの基本波に約2kHzの高周波成分が重畳した波形の出力が可能となっている。基本仕様を以下に示す。

- ・電源電圧：200V, 100kVA
- ・インバータ出力電圧：4×400V、1φ、
- ・出力周波数：50-60Hz
- ・インバータ制御：PWM、
- ・パルスモード：16-32-48パルス
- ・インバータ変圧器出力電圧：44kV(11kV×4段)、100kVA

出力周波数60Hz、48パルスモード、キャリア周波数2880Hzの場合の出力波形例を図8に示す。無負荷の場合には図1と同様の波形となるのに対し、ケーブルのような容量性の負荷の場合は、その影響で高周波成分がなまる。基本波に重畳する周波数成分の大きさと比は、図9に示すように

図7 設計されたPWMインバータのブロック図

Fig.7 Block-diagram of Designed PWM Inverter

図8 PWM電圧波形

Fig.8 PWM Voltage Waveform

図9 PWM電圧波形の周波数スペクトルの
負荷容量依存性

Fig.9 Load Capacitance Dependency of Frequency Spectrum
of PWM Inverter Voltage

負荷容量の大きさによって大きく影響を受けるため、実験を進めるにあたっては各実験試料形態における電圧波形（周波数成分）や実効値とピーク値の関係を十分把握する必要がある。ここでいう実効値とは各実験条件における装置出力電圧を整流型電圧計を用いて測定した値で、ピーク値はデジタルオシロスコープで読み取った波高値を示す。

＜4・2＞ 評価モデル 3節で示したように、ケーブルの絶縁設計を行うにあたり、PWMインバータ波形に対する設計ストレスと寿命指数を把握する必要がある。供試試

料としては実ケーブルが望ましいが、印加波形が特殊であるために実ケーブルでは破壊特性を得ることが困難であること、また同じ材料の絶縁体に対し印加波形の違いは同様の影響を与えられられることから、図10に示す架橋ポリエチレンプレスシートを用いることとした。

＜4・3＞ 試験条件

＜4・3・1＞初期特性試験

試験条件を以下に示す

－印加電圧波形：PWM波形A及びB*、商用周波50Hz

*PWM電圧発生器の負荷容量を変えて発生させた。

波形A, Bの周波数スペクトルは図9に示す通りであり、波形Aは波形Bと比べ高周波成分がカットされ、より正弦波に近い波形となっている。

－供試試料：架橋ポリエチレンシートモデル($t=0.2\sim 0.4\text{mm}$ ／この厚さ範囲で厚さ依存性がないことを確認したので各波形での破壊電圧をそれぞれの試料厚で除して破壊電界とした)

－試料数：各波形に対して $n=10$

－印加電圧ステップ：10kVより2kV/5minステップ

＜4・3・2＞長期特性試験

－3 電圧レベル選定（波形はPWM波形A）

＜4・4＞ 初期特性試験

＜4・4・1＞ 架橋ポリエチレンシートの試験結果 試験結果を図11に示す。PWM波形による絶縁破壊特性は実効値で比較すると、交流より30～40%低下し、同じPWM波形でも波形周波数成分の異なるAとBでは破壊電界が異なることが判った。

＜4・4・2＞ ピーク値による評価 PWMと商用周波波形の違いに注目すると、周波数成分だけでなく、実効値とピーク値の比率の違いがある。また、同じPWM波形でも負荷容量の増加にともない高周波成分が小さくなり、実効値とピーク値の比が正弦波に近づく。この特徴に注目して試験結果をピーク値で整理すると表1のようになり、ピーク値で整理した破壊電界は波形によらずほぼ一定となる。この結果は、架橋ポリエチレンシートの絶縁破壊が電圧波形のピーク値により決まることを示唆しているものと考えられる。

＜4・4・3＞ 考察 架橋ポリエチレンシートやCVケーブルの絶縁破壊は絶縁体中の異物や電極界面の突起により電界集中が起こり、電気トリートが発生し絶縁破壊につながると考えられている。絶縁破壊のトリガーとなっている電気トリートの発生限界は実験的に求められており、その値は $220\text{kV/mm}^{(2)}\sim 300\text{kV/mm}^{(3)}$ 程度であるが、通常は商用周波交流電圧の正弦波による実験値であるため、電界の実効値で示された値である。トリートの細部の発生機構としては、電界電荷の注入、引き抜きに伴い高速電子が分子鎖を切断していくとする考え方や、電子と正孔の再結合で生じる発

図 10 架橋ポリエチレンシートの実験装置
Fig.10 Experimental Set-up for XLPE Sheet

図 11 架橋ポリエチレンシートの破壊電界
Fig.11 Breakdown Strength of XLPE Pressed sheet

表 1 プレスシートの破壊電界 (ピーク値)

Table.1 Breakdown Strength of Pressed Sheet (Crest Value)

印加試験波形	PWM-A	PWM-B	AC50Hz
ピーク/実効値	2.0	2.3	1.41
破壊電界 [kV/mm]	152	145	149

光による光劣化によるものとする考え方⁽⁴⁾などがあるが、未だ確立された学説はない。しかし、いずれのメカニズムにおいても到達電界 (ピーク電界) に相当する量が所定のしきい値を超えた時に起こる事象が関与していると考えられることから、破壊についてもピーク電界が関与していると考えられる。

このことから、PWM波形のように基本波に高周波が重畳した波形においては、基本波の半サイクル毎に一回ずつ到達するピーク電界値によって、絶縁破壊電界が決定されるという説明が可能である。

〈4・5〉 長期特性試験

〈4・5・1〉 試験結果 図12に試験結果を示す。現在の製造技術で製造されたCVケーブルの商用周波数に対する設

計上の寿命指数 $n=15$ 以上⁽⁶⁾と考えられているが、40kV/mmを超えるようなケーブルの破壊ストレス領域では n はこれよりやや小さく、逆に20kV/mm以下の電界領域ではより傾きが小さくなる傾向を示し、スレッショルド電界の存在を示唆するようなデータも得られている。⁽⁶⁾

今回のPWM波による実験領域は比較的高電界であり、図12から求められる寿命指数、 $n=12.7$ はACのデータとほぼ同等と考えられ、少なくとも重畳する2kHzオーダーの高周波による影響は認められなかった。

〈4・5・2〉 評価及び考察 高周波による周波数加速劣化速度は通常周波数に比例すると考えられている。図6-2に示すような通常の高周波電圧の場合には、高周波の各サイクル毎に高電界の攻撃を受けて劣化が進行するが、図1のようなPWM波形の場合、高周波電圧自身の振幅が小さく、またピーク電圧に達する波の割合も少ない。図5に示すように、インバータが実負荷状態では更にその傾向が顕著になる。

従って、上記の実験結果は、PWM波形において、劣化に影響を与えるようなピーク電界に達する波が、等価的に基本波1サイクルに+、-極性で各一回程度である、と解釈すれば説明可能である。

〈4・6〉 まとめ 初期特性試験によって、CVケーブル絶縁体はピーク値が同じ交流と等価な絶縁設計を行えばよいことが判った。従って、設計電界 E_L としては交流と同じ値を用いることができる。

一方、き電線ケーブルやき電区分開器及び推進コイルを主要構成とするリニアき電線系統では、PWM電源電圧波形が場所によって変化することが予想されるが、この実験結果からCVケーブルの絶縁特性として電圧ピーク値を考慮する必要性が明らかになったので、絶縁設計上、系統電圧のピーク値を把握しておくことが極めて重要な課題となる。

また、長期特性試験によって、CVケーブル絶縁体の寿

図 12 PWM波形に対する
架橋ポリエチレンシートのV-t特性

Fig.12 V-t Characteristics of XLPE Sheet for PWM Voltage

命指数は12~15程度であり、高周波による影響は認められなかった。従って、設計に用いる寿命指数として従来より用いているn=9を採用すれば、十分な裕度をもってケーブルの設計が可能であることが判った。

5. ケーブル試料による長期試験

〈5・1〉 縮小モデルによる寿命特性評価 実器の設計に先立ち、ケーブルの縮小モデルを設計試作し、下記の試験条件で長期課通電試験を実施して長期試験前後の特性比較からPWM波形電圧が絶縁体に長時間加わることが絶縁特性に及ぼす影響を評価することとした。試験線路中の5箇所のケーブルの相互接続には実線路で適用が予定される低圧用のT分岐接続部を用いた。

- ・ 供試試料 C Vケーブル(絶縁厚4.2mm、導体サイズ60mm²)
ケーブル長 10m×5
- ・ 試験電圧 実効値 30kV (ピーク 60kV*)
*正弦波電圧では実効値42.4kV、すなわち10kV/mmに相当する。
- ・ ケーブル導体温度 RT~90℃ 4hr-On~8hr-Off
- ・ 試験期間 3ヶ月
- ・ 試験電界(0-peak) ケーブル絶縁体 14.3kV/mm

図13に試験状況を示す。全試験期間にわたり、ケーブル、接続部とも異常なく耐えた。PWM波形による長期試験後のケーブルならびにT分岐接続部に対して、商用周波電圧による残存性能試験を実施した。結果を表2に示す。

本長期試験の条件(正弦波電界[実効値]10kV/mm相当)は運転電界(実器ケーブル絶縁厚を6mmと仮定した場合:正弦波電界[実効値]3.9kV/mm相当)に換算すると、電圧に対する裕度1.1を考慮しても、下式より500年相当と算出され、ケーブル、T分岐接続部ともこのような厳しい長期試験履歴を受けても、絶縁特性に対して大きな影響を受けていないことが確認された。従って、実器ケーブルの絶縁設計にあたっては〈4・6〉で確認されたように寿命指数n=9を用いればよいことが検証された。

$$\left(\frac{10}{3.9 \times 1.1}\right)^9 \times \frac{3}{12} = 508$$

〈5・2〉 実器の絶縁設計 4節で示したPWM波形に対する基礎特性試験結果、ならびに〈5・1〉で示したケーブル試料による長期寿命特性評価結果より、ケーブルの絶縁設計として、電圧に対してはピーク値を、周波数としては基本波を考慮した設計、すなわち3節に示した4通りの絶縁設計の考え方のうち[1]の方法を用いて絶縁設計を行えばよいことが判った。

これに従い、リニア山梨実験線のき電線システムに用いるケーブルの絶縁厚を算出した。

(1)算出条件

- ・ 対地ピーク電圧 27kV (正弦波実効値19kV相当)
- ・ 走行条件 8hr課電/1日

- ・ 耐用年数 5年
- ・ 寿命指数 n=9
- ・ B I L 125kV
- ・ 設計ストレス: E_L(AC)=20kV/mm
E_L(Imp)=40kV/mm

(近年のCVケーブルの絶縁特性の向上を考慮すると、より高い設計ストレスの採用が可能であるが、ケーブル外径に対する制約も小さいことから裕度を考慮し、従来より交流22kVで用いられている設計ストレスを採用した)

また、対地ピーク電圧には共振等で発生する可能性のある電圧を考慮し、裕度として2倍を見込むこととし、これよりケーブル絶縁厚は以下ようになる。

- ・ ケーブルの所要AC耐電圧値(1hr値)
V_{AC}=19kV×1.1×⁹√8×250×5×1.1×2=128kV
- ・ 所要絶縁厚
t=Max [V_{AC}/20, BIL×1.25×1.1×1.1/40]
=Max [6.4, 4.7] ≒ 7mm

図13 縮小モデルの長期課通電試験状況
Fig.13 Test Scene of Long-Term Test with Reduced Size Model

表2 PWM波形による長期試験前後の縮小モデルの絶縁破壊特性
Table2 Comparison of Insulation Characteristics of Reduced Size Model Before and After Long Term Test

		初期特性	長期試験後
ケーブル	商用周波破壊電圧 30kVより 10kV/30min ステップ*	220kV	210kV 220kV
	商用周波破壊電圧 30kVより 10kV/30min ステップ*	80kV	100kV 90kV 80kV
T分岐 接続部	雷Imp破壊電圧 -100kVより 20kV/3回 ステップ*	240kV	190kV 270kV

〈5・3〉 実器モデルによる長期特性評価 実T分岐接続部3ヶ所を含む長さ50mの長期試験ケーブル線路を建設し、下記の条件で長期試験を実施した。試験電圧として、装置の最高発生電圧である44kVrmsを印加した。

- ・試験電圧：44kV-rms、78kV-peakのPWM電圧波形を連続課電
- ・導体温度：RT~90℃（ケーブル部）
8hr-On~16hr-Off
- ・試験期間：6ヶ月および12ヶ月

試験期間中、ケーブル及び接続部ともなら異常は認められず、実器モデルが十分な寿命特性を有していることを確認した。試験終了後の試料に対して設計目標値に耐えることを確認した後、試料を分割し商用周波電圧による破壊電圧を求め、残存性能を検証した。縮小モデルでの実験結果からケーブル本体で劣化が認められるとは考えられないため、接続部組み込みで試験を実施し、線路システムとしての設計裕度を確認した。

表3に示すように、3試料ともT分岐接続部で絶縁破壊したが、そのレベルは初期と同等であり、また、6ヶ月課電試料と12ヶ月課電試料で残存破壊性能に有意な差は認められなかった。

6. まとめ

浮上式鉄道の車両推進コイルに電源を供給する電線及び接続部に印加されるPWM電圧波形が出力可能な課電試験装置を製作し、これらの波形がCVケーブルの絶縁特性に与える影響について、モデルの初期破壊特性及び長期寿命特性について評価を行った。その結果、以下のようなことが判った。

- (1) CVケーブル絶縁体の初期破壊特性に対しては、ピーク値が等しい商用周波交流電圧波形に対する絶縁設計を行えばよい。
- (2) PWM波形に含まれる高周波が長期寿命に及ぼす影響

表3 PWM波形による長期試験後の
実器モデルの絶縁破壊特性

Table 3 Insulation Characteristics of Full Size
Model After Long Term Test

	試料No.		
	1	2	3
長期課通電試験期間	6ヶ月	12ヶ月	
絶縁抵抗 (2000Vメガー)	2000MΩ 以上	2000MΩ 以上	2000MΩ 以上
インパルス耐電圧 -190kV×3回(RT)	良	良	良
商用周波長時間耐電圧 112kV×3hr(RT)	良	良	良
商用周波長時間破壊 上記に引き続き10kV/1hr ステップで昇圧	132kV 16min T分岐破壊	132kV 51min T分岐破壊	122kV 45min T分岐破壊
T分岐の商用周波初期破壊特性	142kV5min		

について調査したが、高周波成分による明らかな影響は認められず、設計に用いる寿命指数として従来より用いられているn=9を採用すれば十分な裕度があることが判った。

- (3) これらの実験により電線システムの合理的絶縁設計が可能となった。
- (4) 実験で求められた考え方に基づいて設計された実ケーブル及びT分岐接続部を組み込んだ実証線路で長期寿命特性試験を実施し良好な結果を得た。

上記の実験及び考察により、PWM電圧波形に対するCVケーブルの絶縁特性が明らかとなり、適切な絶縁設計が行える見通しを得た。今後は、山梨実験線での実使用下における絶縁劣化特性を研究し、絶縁設計の更なる最適化を図っていく予定である。

(平成9年1月10日受付、同9年8月25日再受付)

文献

[1]須田,西条,池田,奥井, "LSM駆動用PWMインバータの出力高調波", 電気学会論文誌D,112,445,1992

[2] J.M.Oudin et al, "The Use of Thermoplastic Insulated Materials in the Manufacture of DC and AC-Cables", CIGRE 1962, No.209, 1962

[3] T.Kubota et al, "Development of 500-kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line -Part 1: Insulation Design of Cables -", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, 1741, 1994

[4] S.S. Bamji, "Degradation of Polymeric Insulation Due to Photoemission Caused by High Electric Fields ", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 24, No.1, Feb. 1989

[5]架橋ポリエチレン絶縁ケーブル寿命特性調査専門委員会, "架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブルの寿命特性", 電気学会技術報告第514号、1994

[6]金岡他, "XLPEケーブル絶縁体のV-t特性に関する検討", 電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-83-87, 1983

関 秋生

(正員) 1945年11月27日生まれ。68年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月日本国有鉄道入社。87年東海旅客鉄道(株)転籍。新幹線運行管理システム「COMTRAC」の開発、新幹線の工事、保守部門を経て1988年以来超電導浮上式鉄道の開発に従事。技術士(電気・電子部門)

宮本 茂樹 (正員) 1963年5月5日生まれ。89年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年東海旅客鉄道(株)入社、現在に至る。主として超電導浮上式鉄道の開発に従事。

大木 義路 (正員) 1950年12月21日生まれ。78年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。同年早稲田大学専任講師。現在教授。主として、電気・電子絶縁材料、光ファイバ、シリカガラスについて研究。電気学会論文賞、矢崎賞など受賞。

久恒 豊一 (非会員) 1948年1月11日生まれ。1970年3月九州大学電気工学科卒業。同年4月古河電気工業(株)入社。主に、C Vケーブル及び被覆電線の設計ならびに開発業務に従事。現在、同社産業技術部長。

小野 努 (非会員) 1968年9月1日生まれ。1991年3月中央大学理工学部電気工学科卒業。同年4月古河電気工業(株)入社。主に、ケーブル付属品の設計ならびに開発業務に従事。

佐久間 進 (正員) 1954年2月8日生まれ。1977年3月東京大学電気工学科卒業。同年4月古河電気工業(株)入社。主に、超高压ケーブル及び付属品の研究開発ならびに設計業務に従事。