

# 高圧インバータ使用ケーブルに関する 調査報告

2005年1月27日

社団法人日本電機工業会  
高圧インバータケーブルのEMC対策技術WG



社団法人日本電機工業会

## 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 概要 .....	1
1.2 活動目的 .....	2
1.3 活動の内容 .....	2
1.4 活動メンバと活動期間 .....	3
2. 活動成果の整理 .....	3
2.1 各種(各社)接地方式の整理 .....	3
2.2 各種(各社)接地方式の課題 .....	6
2.3 高圧インバータ使用ケーブルの接地方式による安全性 .....	7
2.4 高圧インバータ使用ケーブルの絶縁特性 .....	8
2.5 高圧インバータ使用ケーブルの接地方式による寿命 .....	12
2.6 シミュレーションによる高圧インバータ使用ケーブルの電圧・電流調査 .....	13
2.7 EMC観点での高圧インバータ使用ケーブルの接地方式の検討 .....	28
3. 低圧インバータ使用ケーブルの技術動向と高圧インバータ使用ケーブルの技術動向 .....	29
4. WG活動内容 .....	31
5. おわりに .....	33
付図1～14	

添付資料 高圧CVケーブルPVCシースの高周波V-t試験結果報告書

## 1. はじめに

### 1.1 概要

近年、低圧インバータ用の電力ケーブルに関する検討が進み、IECを中心に規格化が進展している。ところが、高圧インバータ用の電力ケーブルに関しては、低圧インバータと同様なケーブルの製作が困難であるためか検討が進展していないと考えられる。

以上の背景より、JEMAで検討WGを発足し現在まで約3年間協議してきている。

この報告書では、その結果について整理し、今後の高圧インバータ用ケーブルの採用、使用基準に指針を与え、EMC観点での検討も加えて高圧インバータの納入ユーザを含めて産業界に貢献することをその目的としている。

ケーブル自体の変更もWG内で議論したが、CV、CVTを採用していく方向で検討しなければコスト的に工事自体が成立しないという意見が多く、現在使用しているケーブル(CV、CVT)で議論、検討することを取り決めWGをスタートした。ちなみにCV、CVTは商用周波数の電力用として生まれており、そのシールドは接地されることを前提として作られている。シールドは基本的に対地電位を想定しているので、シーズも素手で触れてもよい規定となっていた。

シーズの寿命検討に際して、種々のケーブルに関するデータ及び文献を調査した結果、ケーブル心線—対地(シールド)間の主絶縁に関する文献は多々見受けられたが、シーズ材のPVCに関してのV-Tカーブについてはその検討がなされていないという状況であった。このため、シーズ材のV-Tカーブを基礎研究するところからスタートし、第三者機関である(社)電線総合技術センターにその結果の追従データを試験確認いただき、我々の得たデータで間違いないことを追加評価した。

本WGでの検討結果として、次の事項をまとめた。

- (1) シールドの接地方式は、各社で異なることが分かった。
- (2) 上記の各社方式でシールド—対地間に印加される電圧を実機データ、シミュレーションで検討してきた。A社の両端接地方式が最も対地電圧が低いと想定されるが、逆に高周波電流ピーク値は大きく、主回路方式とEMC観点により採用判断が必要との見解。
- (3) 現状のB社方式(主回路から遠い側で片端接地)が最も非接地端のシールド-対地間の電圧が高い。
- (4) 上記B社電圧でも、正常な状態であれば、シーズの部分放電検証結果から得られたV-Tカーブ(絶縁劣化)からも100年以上の寿命が推定され、ケーブル劣化等の他の寿命要素がなければ全く寿命には問題がないことまで明らかになった。(＊参考文献参照)
- (5) ケーブルの劣化は、等価的に熱劣化で模擬できるとの見解[(社)電線総合技術センター]を得て、熱劣化させたケーブルでの上記同様のシーズV-Tカーブ試験を実施し、熱劣化の有無でその特性にほとんど変化がないことを確認した。
- (6) 上記シーズ寿命試験の結果、シーズ—対地間の絶縁破壊が生じても主絶縁は全く劣化の兆候がなく、この結果のみでも現在の使用方法で長期使用に問題がないと考えられる。よって、現在の各社高圧ケーブルの使用方法で寿命的には問題がないことが確認できた。
- (7) 主回路素子のスイッチングの瞬間、シーズ—対地間に電圧が印加される(時間平均的には対地電位に固定される)が、この瞬間の過渡電圧の人体に対する影響を審議した。参考とした文献、資料からは限りなく影響なしとの結果であるが、湿度などの環境による影響を判断しきれないため、工事などにおいて活線状態でシーズ表面に触れる場合は、絶縁手袋の着用を義務付けるなど配慮が必要との見解で一致した。また、通常は、ケーブル敷設場所近傍にシーズ表面を素手で触ると危険である旨の注意表示を推奨することで参加各社の合意を得たことを申し述べておく。
- (8) EMC観点でのCV、CVTケーブルの接地方式としては、そのシールドを片端、両端のいずれかで接地する場合、接地幹線をインバータ専用線を配備してスイッチング時の高周波電流が、不特定な接地ルートで外部に流出するのを避け、インバータに戻る形にする方が好ましい。低圧インバ

ータの世界でも、接地線をケーブル内にもつ専用ケーブルを採用して標準的に採用される方向であり、今後の技術方向と考えられる。ただし、高圧ケーブルに関しては、接地線をケーブル内に有した専用ケーブルが見当たらない。また、専用ケーブルでは外径が大きくなり、敷設作業が困難と推定されることより、CV、CVTで同様の効果がある接地系を採用する工事基準の制定が望ましい。現時点の調査では、各社統一されていないのが現状である。

\*参考文献：電気学会・第35回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム(H16.11.17, 18)予稿集 (H-1)P145～P148、「高圧インバータケーブルのシース絶縁特性」三菱電機・和田他

## 1.2 活動目的

- (1) 高圧出力インバータに使用している高圧ケーブルは、電力用のCV、CVTが一般的である。このケーブルは、インバータ用に仕様が決められたものではなく、一般的な見地でのインバータ使用において問題がないかの評価が必要であった。
- (2) 低圧出力インバータ用では、国際的にインバータ使用にマッチしたケーブルが開発、考案され、標準化されようとしている。この観点でも、日本ではまだインバータ用ケーブルの評価が遅れている。特に、既に使用を継続している上記高圧ケーブルのEMC観点での評価が接地方法も考慮されて至急検討されなければならない。上記状況を本WG参加の関係会社で確認し合い、その総意に基づき検討を進めることとなった。

## 1.3 活動の内容

2か月に1回の頻度でWGを開催し、総計16回の会合を行った。

途中、各WG委員所属の会社工場視察を含め、委員会の親睦をはかり見識の向上を図った。

下記内容の検討と審議を実施してきた。

### 1.3.1 CV、CVTのインバータ使用時の課題

- (1) インバータの構成スイッチング素子のスイッチング時に出力電圧が急峻に変化し、この際に、瞬間ではあるがシールドに対し電圧を発生する現象があることが認識された。この電圧の影響を評価する必要がある。
- (2) 各社接地方式の整理とシールドの電位、電流の検討
- (3) ケーブルの寿命への影響の有無(特にシース寿命)
- (4) 安全上の課題の有無

### 1.3.2 シミュレーションによる検討

- (1) 各社接地方式
- (2) EMC観点での望ましい接地システムの検討

#### 1.4 活動メンバと活動期間

重電各社より参加いただき、オブザーバとして東京工業大学の赤木教授を迎え、下記陣容でのWGが発足した。

東京工業大学 大学院	赤木 泰文教授	オブザーバ
理工学研究科 電気電子工学専攻		
東芝三菱電機産業システム(株)	溝口 昭次	主査[WG発足当時三菱電機(株)]
	増田 博之	委員[WG発足当時三菱電機(株)]
	木下 雅博	委員[WG発足当時三菱電機(株)]
	(2004年7月退任)	
	細田 博美	委員[WG発足当時(株)東芝]
	小玉 純康	副主査[WG発足当時TGA(株)]
	高野 幹男	委員[WG発足当時TGA(株)]
(株)日立製作所	飛世 正博	副主査
	小林 清隆	委員
富士電機システムズ(株)	佐久間 新	委員
(株)安川電機	谷口 靖	委員
(社)日本電機工業会	井上 博史	事務局

活動期間：準備期間2001年6月～2002年2月4日

WG活動開始2002年2月4日(第1回)～最終WG2005年1月27日(第16回)

## 2. 活動成果の整理

### 2.1 各種(各社)接地方式の整理

各社の高圧インバータの接地方式について、以下の項目についてアンケート調査を行った。

- (1) 回路仕様(定格交流電圧、定格直流電圧、回路方式、主回路素子)
- (2) 高圧ケーブルのシールド接地方法
- (3) 主回路接地方法
- (4) ケーブル仕様(その他耐電圧仕様以外で指定している条件)
- (5) ケーブル長、条数に対する制限と具体的な数値
- (6) 高圧ケーブルを使用した既設装置(高圧・電圧形インバータ)の稼動年数
- (7) 出力dv/dtの緩和を目的としての対策有無

調査結果を表2.1-1、その回路図を図2.1-1～2.1-4に示す。

調査結果から、特に高圧ケーブルのシールド接地方式は各社で異なることが分かった。

#### ①各社接地方式

- A社： シールド両端接地  
B社： シールド片端接地(インバータ装置から見て遠方側の機器側で接地：モータ端接地)  
C社： シールド片端接地(発信端側で接地：インバータ端接地)  
D, E社： シールド片端接地(インバータ端接地)

#### ②主回路方式

- A, B, C社： 中性点クランプ3レベル方式  
D, E社： マルチレベル方式

表2.1-1 高圧インバータの接地方法調査結果まとめ

メーカー名	A社	B社	C社	D社	E社
回路仕様	AC電圧 (kV) DC電圧 (kV)	3.3  2.35×2	3.3  3×2	3.3(GTO)/1.9(IGBT)  3×2/1.65×2	3.3/6.6  1.3(単位INV当たり)  3レベルINV組合せマルチレベル
	回路方式	3レベル	3レベル	3レベルINV組合せマルチレベル	2レベルINV組合せマルチレベル
	主回路素子	GTO/IEGT	GTO/GCT	GTO/IGBT	IGBT
	ケーブルのシールド接地方法	両端接地	受信端側機器で接地	発信端側機器で接地処理を原則とするが受信端でも可	INV側で接地
主回路接地方法	盤内の高圧アースを低インピーダンスで中性点に接続	盤内の高圧アースを高インピーダンスで中性点に接続	盤内の高圧アースを中インピーダンスで中性点に接続	スター結線された直列多重単相INVの中性点側で抵抗接地	非接地
ケーブル仕様(特殊指定の有無)	①ケーブルは3kVのCVケーブルを使用する。6kVのCVケーブルでも可。  ②導体サイズは定格電流で選定するが、シールド線に電流が流れて発熱をすることを考慮し、電流低減率を少なめに設定する。  (例)通常であればケーブル低減率0.7で良いところを0.6で選定する。  ③3心ケーブル>CVT>单心3本の俵積み、の順に選定する。	①特殊仕様の指定なし  ②ジョイント不可  ③3心ケーブル>CVT>单心3本の俵積み、の順に選定する。	①特殊仕様の指定なし  ②3心ケーブル>CVT>单心3本の俵積み、の順に選定する。  6kVDC : 6.6kV CVT 3.3kVDC : 3.3kV CVT	特殊仕様の指定なし	特殊仕様の指定なし
ケーブル長、条数の制約	速度センサの耐ノイズ性などに配慮して線長を制約、実用上は200m程度で運用	制約は特になし  実用上は300m程度	制限なし	制限なし	通常の範囲(数100mまで)は特に設定なし
高圧ケーブルを使用した既設INVの稼動年数	2300Vクラス : 9年  3300Vクラス : 8年	2300Vクラス : 11年  3300Vクラス : 9.5年	2200Vクラス GTO : 12年  3300Vクラス GTO : 6年  2200Vクラス IGBT : 4年	5年	7年
出力dv/dtの緩和対策の有無	特になし	特になし	特になし	電圧ステップが低圧と同じであるため、対策は不要と考えている	特になし(DC母線電圧が小さくdv/dt小さいため、必要ないと認識している)
接地方法回路図	図2.1-1	図2.1-2	図2.1-3	図2.1-4	図2.1-4

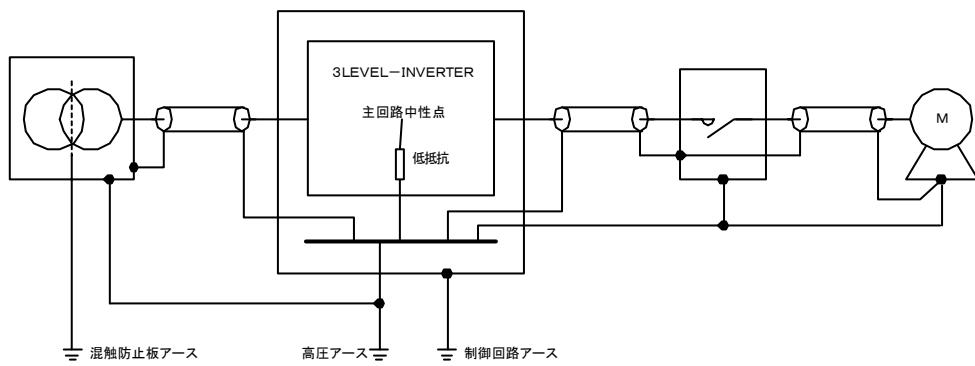


図2.1-1 A社接地方式

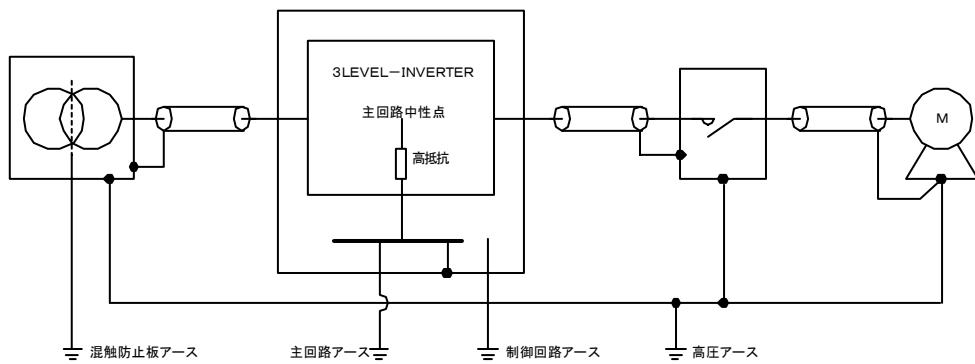


図2.1-2 B社接地方式

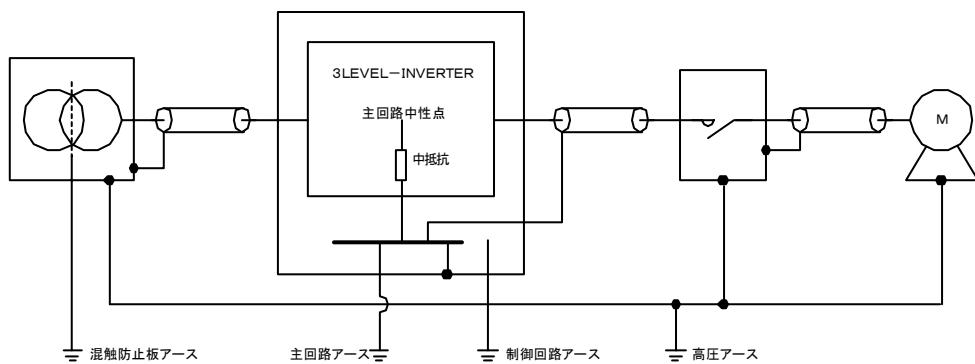


図2.1-3 C社接地方式

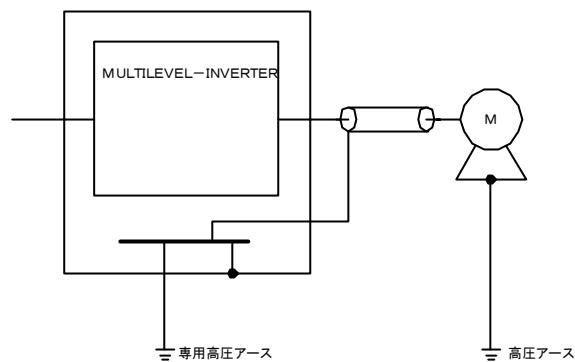


図2.1-4 D社及びE社接地方式

## 2.2 各種(各社)接地方式の課題

### 2.2.1 各種接地方式の特徴と課題

接地方式により、シールドの対地電位(シールド—対地間に印加される電圧)やシールドに流れる高周波電流が異なってくる。シールド接地方式については、電源側のケーブル接地方式も考慮する必要があるが、基本的な考え方はインバータ側と同じであり、インバータ側について討議することとした。ケーブル接地方式を調査した結果は、2.1に示すとおりである。それらの方式について、次のようなことが課題として考えられた。

#### (1) 両端接地(A社)

この方式はシールドの開放端がなく、シールド電圧を最も低く抑えられる。電力用ケーブルにおいては、非接地端のシールドへの誘起電圧実効値が一定の値を超えることが想定される場合には、安全のため両端接地が行われる場合があり、この値は、50V\*を基準とされることがある。

一方、漏れ電流に関しては、両端接地であることによりアースを帰路とする電流が多く流れることが考えられ、この場合にはシールド自体の発熱の問題を検討することが必要となる。また、主回路に帰路する電流の大きさによっては、インバータ主回路への影響を無視できないことも予想され、特に配線長が長い場合は負荷ケーブルは複数本で布線されるため、この電流はさらに増加することが考えられた。

ただし、インバータのスイッチングによって生じる電流は周波数が高いため、インバータ側からみたケーブルインピーダンスは、この周波数成分に対しては高インピーダンスとして作用するものと思われ、スイッチングによる漏れ電流に関しては、後述の2例に対して、必ずしも大きくなるとはいえない可能性も考えられた。

注\* 労働安全規則第5章第6節354条

#### (2) モータ端接地(B社)

この方式は、シールドに流れる高周波電流経路のインダクタンス成分が最も大きくなることから、シールドに流れる電流を最も低く抑えることができる一方、非接地端であるインバータ側において、シールドに誘起される電圧が最も高くなることが予想された。

#### (3) インバータ端接地(C, D, E社)

調査対象とした中では、最も多く採用されている方式であった。

この方式は、インバータ側で接地されていることにより、ケーブルシールドを介した高周波電流が、モータ端接地に比較してインバータ主回路に流入しやすいことが予想された。また、同様にモータ端ではシールドに誘起される電圧が高いことが考えられた。

#### (4) ケーブル中間点における誘起電圧

プラントにおいては、インバータ周辺設備の保守・点検のため、インバータ出力に開閉器又は断路器等が設置されることがある。これら機器の接続点におけるシールド誘起電圧が、どのような値となるかも課題となつた。

### 2.2.2 安全性の課題

シールドの電位は対地電位と等価である前提であるので、シールドに生じる対地電位に対するシース部の絶縁耐量(寿命)の評価、及び安全性(人体への影響)について検討する必要があった。

### 2.2.3 EMC観点での課題

EMC観点に照らした場合の接地方式について、低圧インバータの技術動向を踏まえ、高圧インバータに適した指針を提供することが課題となつた。

### 2.3 高圧インバータ使用ケーブルの接地方式による安全性

ケーブルシースは、内部シールド線の接地処理により、対地電位に固定されているという前提で認識されている。しかしながら、2.6で示すようにケーブル内部のシールド線には数μs幅の電圧が誘起されており、その電圧は主回路変換器の構成や接地方式の違いによるが $2000\sim3000V_{p-p}$ になっている。

ケーブルの布設工事において、作業者が通電中のケーブルシースに触れる可能性があり、上記の電圧値及び周波数値の安全性について調査した。調査内容は「電圧値と周波数と人体への影響」で、その調査結果を以下に示す。

#### (1) 感電に関する調査－1：感電による人体への影響について

財団法人省エネルギーセンター>Q & A>検索「感電」

[http://ECCj06.ECCj.or.jp/Cgi-Bin/qAnDA/hE\\_qA/EIEC/D0104.html](http://ECCj06.ECCj.or.jp/Cgi-Bin/qAnDA/hE_qA/EIEC/D0104.html)

表2.3-1 人体に対する電流の作用(実験値)

電撃の影響	直流		交流			
			60Hz		10kHz	
	男子	女子	男子	女子	男子	女子
感知電流、少しチクチクする	5.2mA	3.5mA	1.1mA	0.7mA	12mA	8mA
苦痛を伴わないショック、筋肉の自由がきく	9	6	1.8	1.2	17	11
苦痛を伴うショック、ただし、筋肉の自由がきく	62	41	9	6	55	37
苦痛を伴うショック、離脱の限界	74	50	16	10.5	75	50
苦痛を伴うはげしいショック、筋肉硬直、呼吸困難	—	—	23	15	94	63
心室細動の可能性あり、通電時間0.03s	1300	1300	1000	1000	1100	1100
心室細動の可能性あり、通電時間3.0s	500	500	100	100	500	500
心室細動が確実に発生する	上記の値を2.75倍する。					

資料：電気工事士教科書 (社)日本電気協会

表2.3-1に示すように、人体に対する電流の作用(実験値)の比較では、60Hzと10kHzでは感度が大幅に異なる値になっている。

#### (2) 感電に関する調査－2：感電

<http://ContEst.thinkquEst.gr.jp/tqj1998/10157/worD/txt34.htm>

電流が人体を通過すること、及びそれによって起こる障害。工業電流によるものと、自然に発生する電気の放電(落雷)によるものとがある。電流が人体を通過すると中枢神経系、特に呼吸中枢の麻痺と心臓の心室細動を起こし瞬時に死んでしまうことがある。電流が人体を通過する際に最も重要な因子は皮膚の電気抵抗であり、電流の種類(交流、直流)、電圧、強さ、作用時間なども重要な因子である。皮膚の最外層の角質層が特に著しい電気抵抗を示し、角質層の厚い手のひら、かかとでは電気が伝わりにくい。一方、汗などでぬれると伝わりやすくなる危険である。また、200Vを超えると急速に危険度を増す。200V以下では直流の方が交流より伝わりにくく、交流電気の周波数が家庭電灯線の50~60Hzのときは、同じ電圧の直流電気の約4倍の危険性があるという。しかし、高周波(50kHz以上)の場合は無害である。感電死例の最小電気量は50mAであるが、100mA以下では生命の危険はほとんどない。交流の場合、50~100Vの死亡例があるが、普通300V以上が致命的で、150~300Vでは危険といわれる。

(以下、省略)

### (3) 医療関係の調査－1

出典元：「医用電子と安全技術」南任靖雄・江澤正共著、工学図書株式会社発行(1995.9.25)

pp.13-14

交流電流の周波数は、人体組織を通過する電流が引き起こす効果の種類に影響する。図2.3-1は人の両手に通電した場合に、生じる感覚と離脱の可否に対する電流レベルを示す。グラフ1は人が電流を感じるはずの限界電流値を示し、グラフ2及びグラフ3は各々50%の人及び99.5%の人が電流を感じる閾値を表す。グラフ4は99.5%の人が通電体から逃れられる(Let go)限界値を示し、グラフ5と6は各々50%及び0.5%の人が逃れられる限界値を示す。一点鎖線は感知電流(電流を感じる限界電流値)及び離脱電流の最低限界値を示す。

以上の調査結果より、人体への安全性については下記がいえる。

(3) の文献より、商用周波数(50Hz/60Hz)での感知電流=0.5mAに対し、感知電流は1kHz以上では周波数比例になるので、

- ・10kHz(100μs周期、50μs幅)では、感知電流=5mA
- ・100kHz(10μs周期、5μs幅)では、感知電流=50mA

になるので、低圧交流電源600Vで感電しない作業手順(例えば、革手袋での作業)で作業する場合は、

- ・10kHzでは6000V

まで感知電流に達しないことになる。よって、2000~3000V<sub>p-p</sub>のシールド電位に対しては、革手袋などの絶縁破壊問題がなければ、人体の感知電流には至らないことが分かった。

しかしながら、電位のあるケーブルシースに触ることは好ましくないので、少なくとも低圧交流電源に触れる可能性のある作業では、その要領書を守ることが必要といえる。

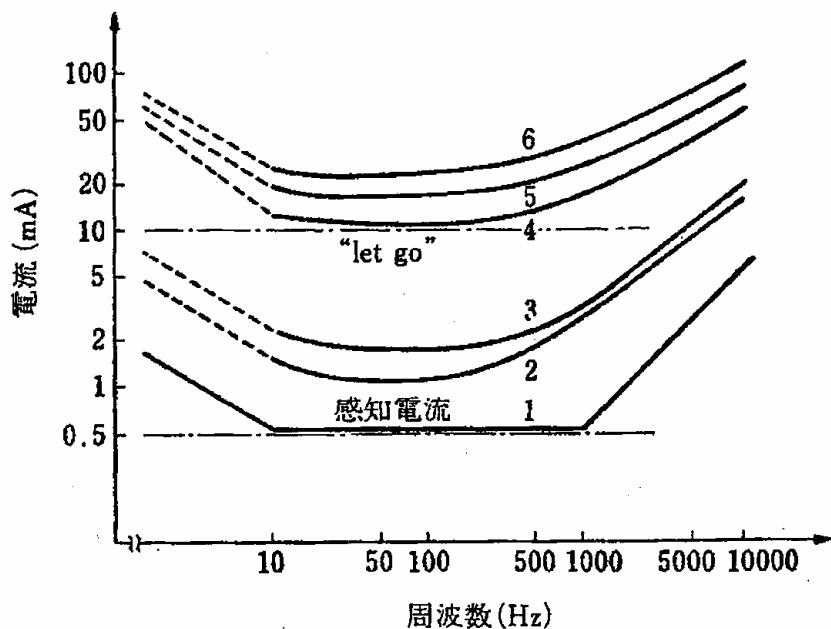


図2.3-1 人の両手にさまざまな周波数の電流を通じたときの効果

## 2.4 高圧インバータ使用ケーブルの絶縁特性

インバータのスイッチングにより誘起される高周波電圧により、ケーブルシースの絶縁劣化が懸念された。シースは外傷防止が主目的であることもあり、電線メーカーにはシース絶縁性能を示すデータベースは存在しなかつたが、高周波サージに対する高圧ケーブルシース材の部分放電特性、V-T特性について研究報告(1)がされている。

また、第三者機関として、(社)電線総合技術センターの協力を得て、ケーブルシースのV-T特性について同様に評価いただき、この研究報告の妥当性を確認した。

#### 2.4.1 高周波サージに対する高圧ケーブルシース材の絶縁特性(1) 抜粋

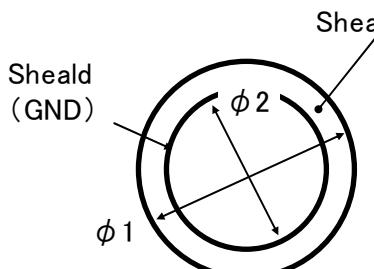


表2.4-1 ケーブル諸元

シース材	PVC
シース厚(mm)	3.1mm
ケーブル外径 $\phi 1$	39mm
シールド外径 $\phi 2$	32.8mm

ケーブル試料 : 6600V, 325mm<sup>2</sup> CVケーブル (2000年、三菱電線製)

図2.4-1 ケーブル形状

#### (1) ケーブルシース部分放電特性1(AC電圧印加時の CSV : コロナ開始電圧, CEV : コロナ消滅電圧特性)

ケーブルシースの熱劣化の有無による部分放電特性の試験結果を図2.4-2に示す。

- ①シース熱劣化の有無でCSV, CEVの有意差は見られない。

※熱劣化 : ケーブルの長期使用を考慮し、シース材であるPVCの耐熱寿命特性から、110°Cの環境下で500h時間放置(PVC伸び残率として劣化無の70%相当)したケーブル試料

- ②CEVはCSVの約90%である。

- ③CEVの最小値は、約7 kV<sub>p-p</sub>である。

6600V CVケーブル (60pps)

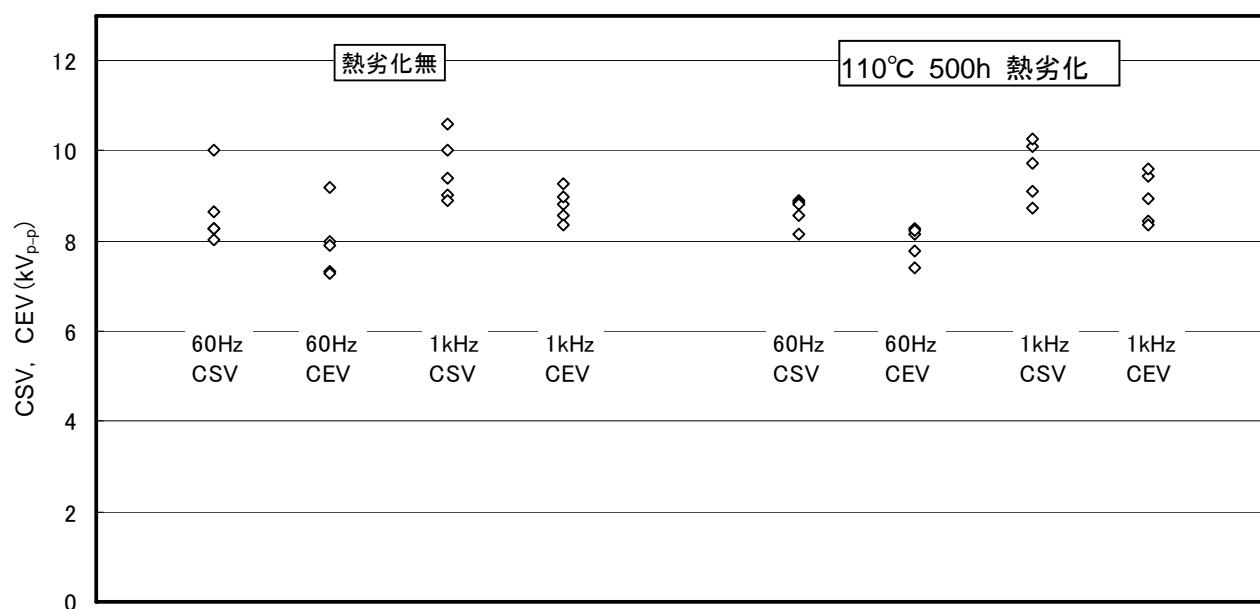


図2.4-2 AC印加時のCSV, CEV(熱劣化の有無による比較)

#### (2) ケーブルシース部分放電特性2(パルス電圧印加時のCSV, CEV特性)

パルス電圧(パルス幅1, 10, 100μs)を繰り返し印加し、部分放電電圧レベル及びその発生確率を求めている。結果を図2.4-3及び図2.4-4に示す。

- ①CSVの電圧レベルはACのpeak to peakとパルス幅100μsのpeak to peakの値は、ほぼ同じである。

- ②パルス幅が短いと、部分放電が発生しにくくなる。CSV発生確率1%時の電圧レベルは、パルス幅1μsでは約12kV<sub>p-p</sub>, パルス幅100μsでは7.5kV<sub>p-p</sub>である。

- ③実駆動時の発生サージは、サージ幅が1.5μs程度と短いため、CSV付近における部分放電の発生確

率が極めて低くなり、CSV付近における劣化寿命はACよりも長いことが予測される。

#### 部分放電発生確率

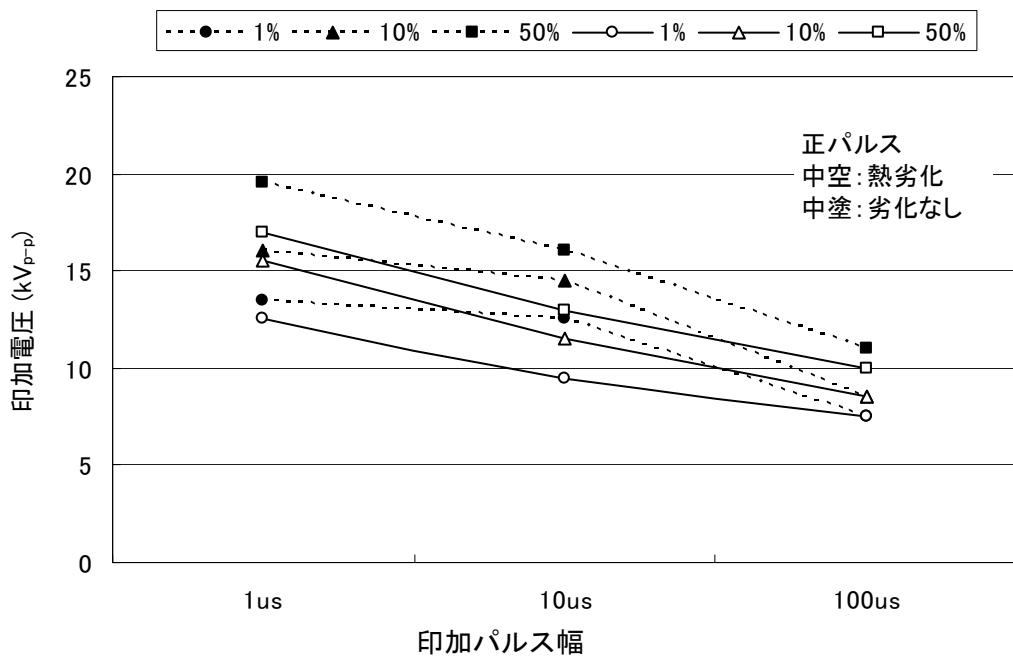


図2.4-3 正極性パルス印加時のCSV(熱劣化の有無による比較)

#### 部分放電発生確率

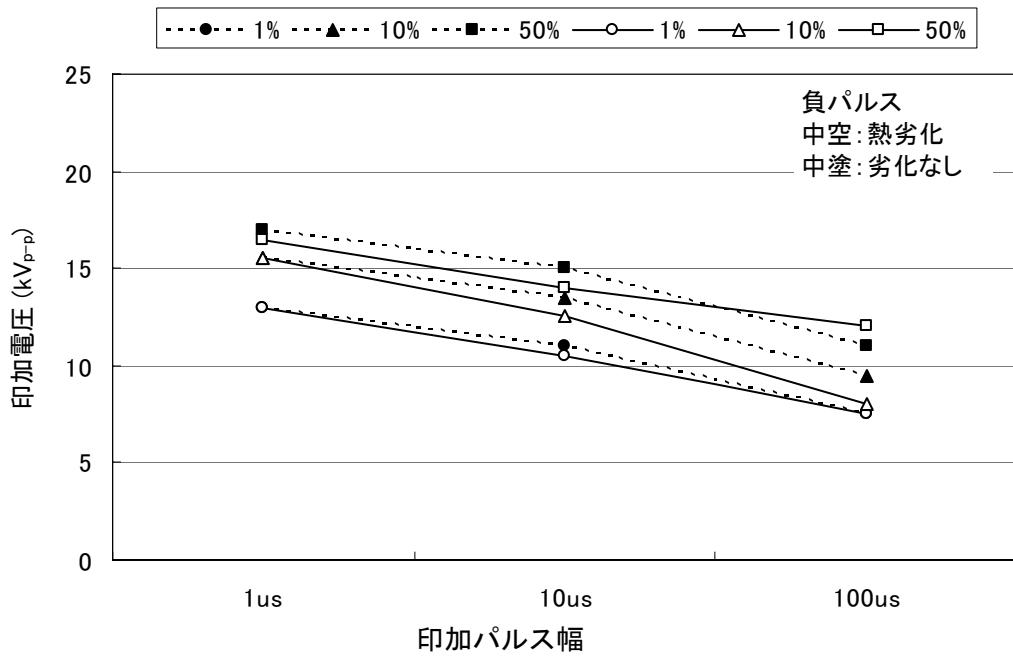


図2.4-4 負極性パルス印加時のCSV(熱劣化の有無による比較)

### (3) ケーブルシースV-T特性

ケーブルシースの余寿命評価のために、熱劣化有無でのケーブルシースのV-T試験を実施している。その結果を図2.4-5に示す。

- ①周波数、シース厚が一定のときのV-T特性は、印加電圧波形(AC/単極性パルス)、電圧印加箇所(シールド—対地間、シールド—シールド間)によらず、印加電圧のpeak to peak値で決定される。
- ②熱劣化有のケーブルの寿命特性は、熱劣化なしと大きく変わらない。
- ③実サージの測定最大値2.8k V<sub>p-p</sub>に対して十分な寿命(100年以上)が確保される。

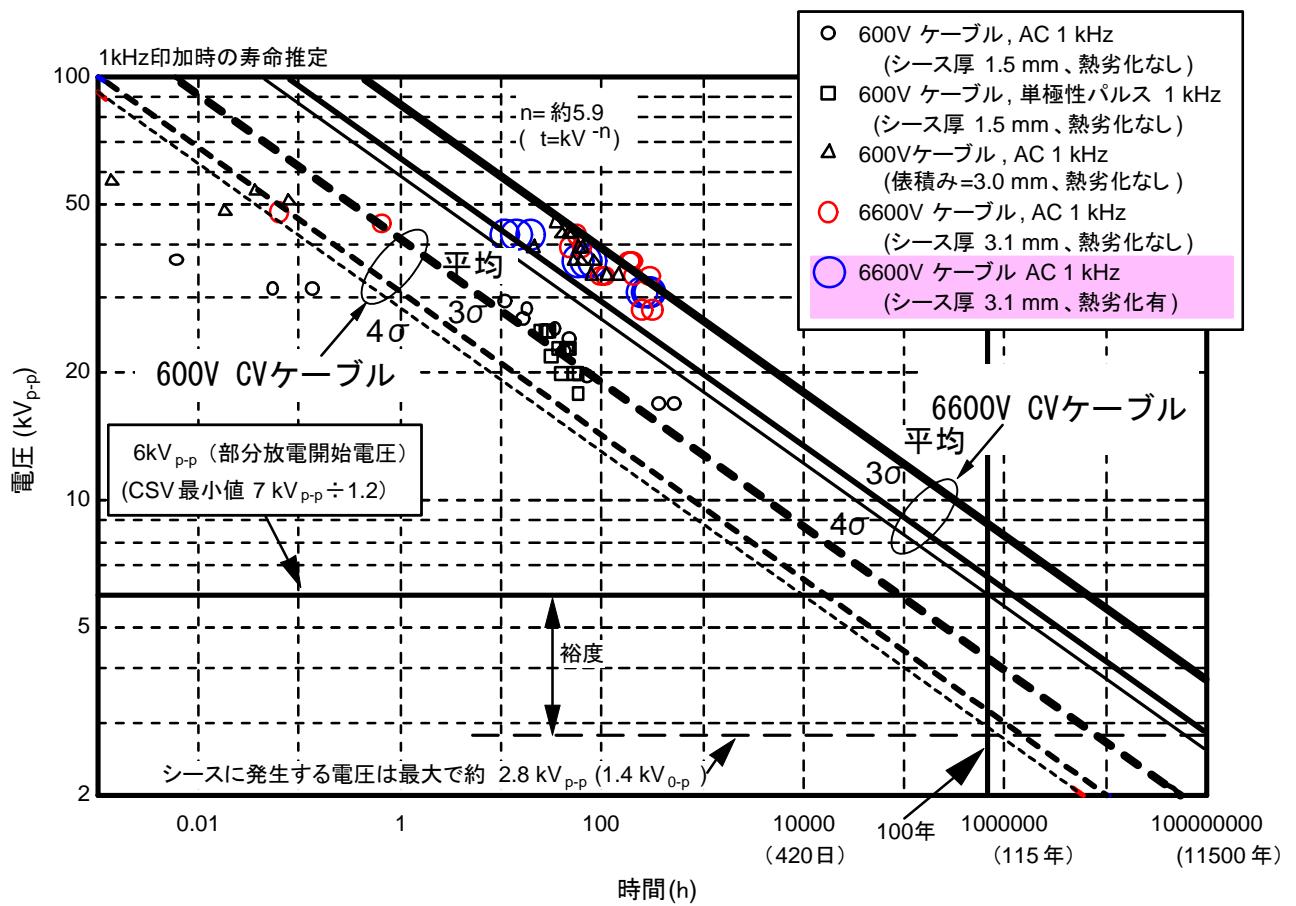


図2.4-5 V-T試験結果

#### 2.4.2 (社)電線総合技術センターでのV-T特性試験結果

CVケーブルのPVCシースにAC1kHz・12.7kVの高周波高電圧を課電してPVCシースのV-T特性を求めた。試験結果を添付資料に示す。

供試ケーブル：6600V, 325mm<sup>2</sup> CVケーブル (2000年, 三菱電線製)

##### (1) 試験方法

AC1kHzの高周波電源電圧を一定(実効値でAC12.7kV)にしてPVCシース厚さを変える(正規PVC 3.1mmを基準とし, その厚さを1.9~0.4mm削ってシース厚を低減した部分を作る)ことにより, 印加ストレスを変えV-T特性を把握。

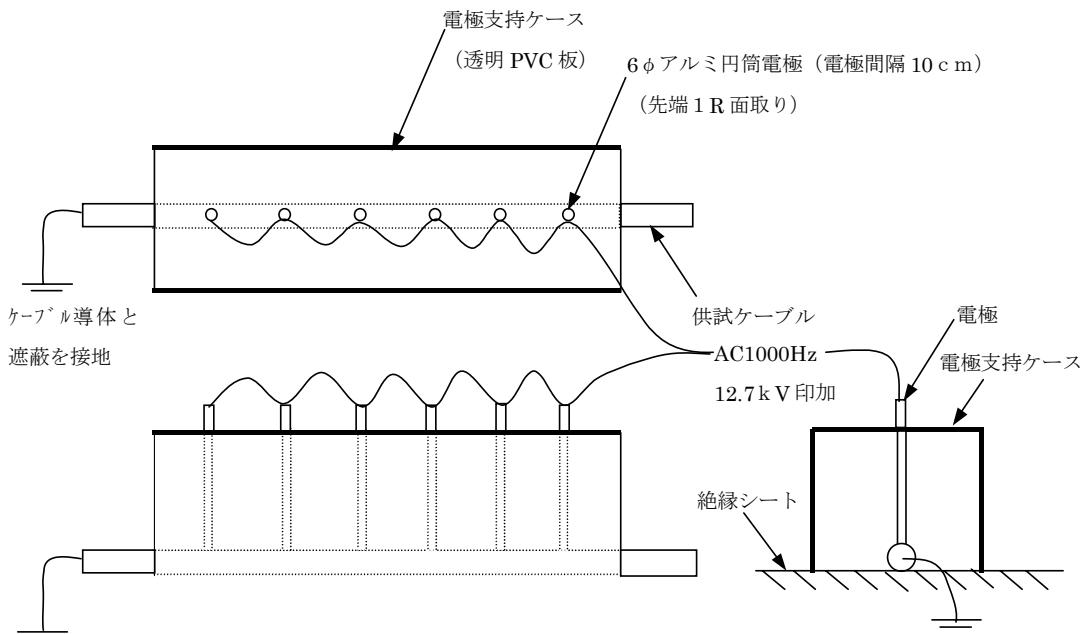


図2.4-6 試験回路

## (2) 試験結果

試験結果を図2.4-7に示す。本結果と2.4.1で得られたV-T特性(図2.4-5)は、ほぼ同等の特性であり、妥当であることが確認出来た。

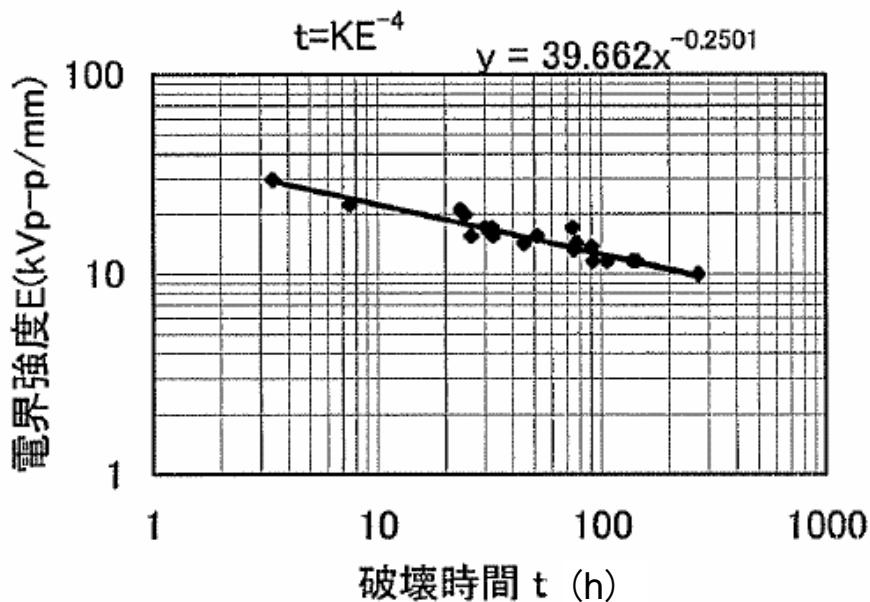


図2.4-7 高圧CVケーブルPVCシースのV-T特性

図2.4-5の6600Vケーブルはシース厚3.1mmで40kV印加時の寿命は100hであり、シース1mm当たりの電界強度に換算すると $40/3.1=12.9\text{kV/mm}$ である。これを図2.4-7で読み取るとほぼ100hになるので、両者はほぼ同一の結果を示していることが容易に理解できる。

## 2.5 高圧インバータ使用ケーブルの接地方式による寿命

2.4でのケーブルシース絶縁特性より、実使用下でのシースの絶縁劣化有無について次に考察した。

- (1) ケーブル寿命(伸び残率70%)時のシース部分放電電圧、V-T特性は劣化なしケーブルと比較して大きな差異はない。
- (2) 実際に観測されたシース誘起電圧 $2.8\text{kV}_{\text{p-p}}\text{max}$ (B社：シールドモータ端接地)に対し、ケーブルシ

ースのCSV、CEVIは約 $7.0\text{kV}_{\text{p-p}}\text{min}$ であり、部分放電は生じないといえる。

さらに、誘起されるパルス幅が短いほどCSVの発生電圧レベルは高く（パルス幅 $1\mu\text{s}$ では約 $12\text{kV}_{\text{p-p}}$ ）なるので、実発生サージ $1.5\mu\text{s}$ 幅程度であれば、部分放電発生の可能性は極めて低いといえる。

- (3) 部分放電が仮に発生したとしても、実サージ下 $2.8\text{kV}_{\text{p-p}}$ 、 $1\text{kHz}$ （熱劣化あり）での寿命は100年以上であり、ケーブル寿命内での絶縁劣化の懸念はないといえる。
- (4) シースに誘起される電圧が最も高いと考えられるシールドモータ端接地方式において、上記のとおりであり、他のシールド接地方式であれば、さらに絶縁劣化の懸念はないといえる。
- (5) 部分放電により、シースを絶縁劣化させたケーブルの主絶縁部分には、シースの絶縁劣化の影響は見られなかった。
- (6) 高圧インバータに使用する高圧ケーブルのジョイントは、ジョイントを実施することによりシース部のCSVが低下し、その寿命が短くなることが予想される。

## 2.6 シミュレーションによる高圧インバータ使用ケーブルの電圧・電流調査

3レベルインバータなどの電圧形インバータにおいて、スイッチング時に各部の浮遊容量を介して比較的高い周波数の接地電流が流れることは知られているが、どの部分の浮遊容量がどのように影響するのか明確でない。また、接地電流の流れる経路のインダクタンスについても、分からぬ点が多い。各部の浮遊容量Cを想定したシミュレーションにより、接地電流の流れるメカニズムを明らかにする。

さらに、実機測定データとの比較により、シミュレーションと実機との整合性を高める。

### 2.6.1 対象システム

#### (1) 3レベルインバータ

図2.6.1-1に対象システムである3レベルインバータの概要を示す。3レベルインバータの特徴として、直流電圧をコンデンサにより分圧し、図2.6.1-2に示す3種類のスイッチングモードをとることによって、各相独立して正電圧、ゼロ電圧、負電圧の3レベルの電圧を出力することが挙げられる。図2.6.1-2 b)は直流中性点に電流が流れるモードであり、3レベルインバータ特有のものである。スイッチング素子としては、GTO、GCT(IGCT)、IGBT、IEGTなどいろいろな素子が使われるが、ここではIEGT素子を用いた3レベルインバータで検討した。表2.6.1-1に今回検討した製品の仕様を示す。

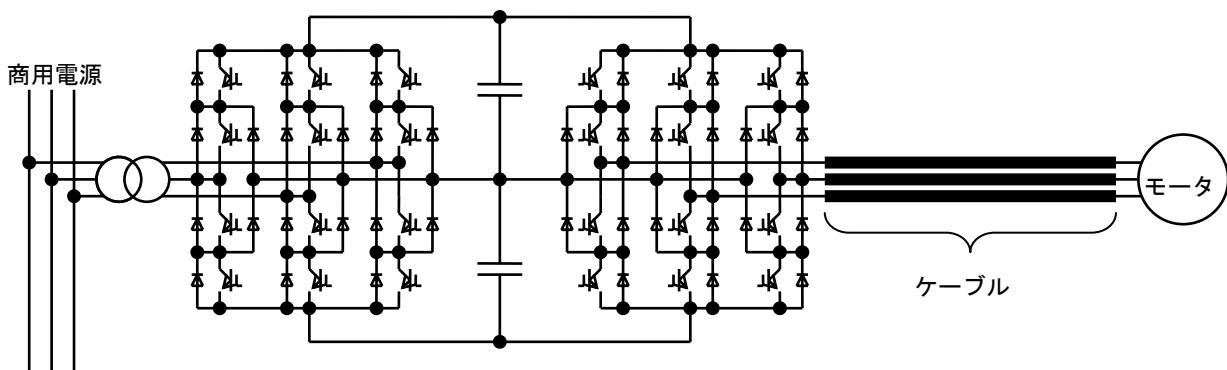


図2.6.1-1 3レベルインバータシステム

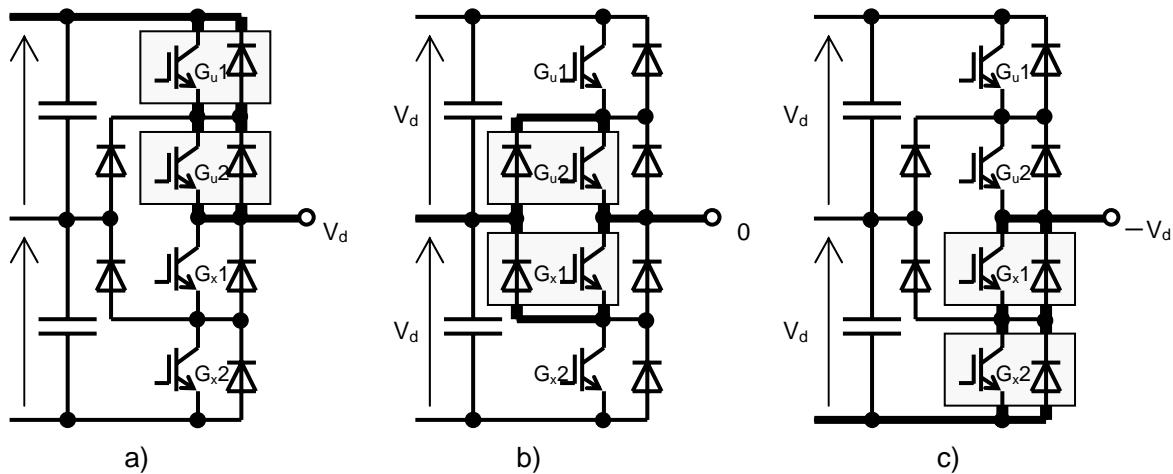


図2.6.1-2 3レベル変換器のスイッチングモード(一相分)

表2.6.1-1 3レベルインバータ製品仕様

項目	仕様
定格容量	8MVA(過負荷150%‐1分)
定格電流	1358A
最大出力電圧	3400V
直流電圧(P・Nそれぞれ)	2345V
スイッチング時間	約1μs
直流コンデンサ(P・Nそれぞれ)	12000μF
キャリア周波数/制御周波数	512Hz/1024Hz(キャリア山・谷)
デッドタイム/最小ONパルス幅	20μs/25μs
スイッチング素子	IEGT素子(4.5kV‐4kAターンオフ)
冷却方式	水冷

## (2) 主回路ケーブル

インバーター—モータ間には、シールド付きケーブルが使用される。表2.6.1-2に一般的に多く使用されるケーブルの特性を示す。なかでも多く使われるのは、 $250\text{mm}^2$ 及び $325\text{mm}^2$ で、モータ容量に応じて、並列接続する。長さは短い方がよいが、既設更新などでは設置場所の制約もあり、長くなることがある。並列数が増えたり、長くなったりすると静電容量が大きくなるので、接地電流が増加することが考えられる。

表2.6.1-2 ケーブル特性表

電圧 V	種類	心数	サイズ $\text{mm}^2$	許容電流 A	導体抵抗 $\Omega/\text{km}$ 20°C	リアクタンス $\text{mH/km}$	静電容量 $\mu\text{F/km}$	質量 $\text{kg/km}$	仕上外径 mm	導体外径 mm	絶縁体厚さ mm	銅テープ厚さ mm	シース厚さ mm
3300	CVT	3	200	485	0.0933	0.308	0.510	7406	67.0	17.0	3.5	0.1	2.7
3300	CVT	3	250	560	0.0754	0.302	0.550	8980	71.0	19.0	3.5	0.1	2.8
3300	CVT	3	325	660	0.0579	0.289	0.610	11400	78.0	21.7	3.5	0.1	3.0
3300	CVT	3	400	750	0.0471	0.289	0.590	14400	86.0	24.1	4.0	0.1	3.2
3300	CVT	3	500	855	0.0376	0.281	0.660	17000	93.0	27.1	4.0	0.1	3.4
3300	CVT	3	600	950	0.0314	0.279	0.710	20200	100.0	29.5	4.0	0.1	3.6

### (3) ケーブルシースの接続

シース付きケーブルを使用しているので、その処理方法によって影響が異なる。

メーカ調査で、2.1のように各社異なることが分かった。

ここでは、各接続方式の特性比較を行う。

### (4) モータの接地

モータも主回路—フレーム間に浮遊容量が考えられ、そこを介した接地電流が流れるので、モータの接地も影響があると考えられる。

### (5) ケーブルシース電流発生のメカニズム

図2.6.1-3は、IEGTインバータの接続例でケーブルシース電流の発生するメカニズムを示すものである。ケーブルシースを変換器側とモータ側の両サイドで接地している場合、インバータのスイッチングにともない、次のようなルートで接地電流が流れる。

まず初期状態として、U、V、W相がゼロ電圧出力モードにある状態を考える(Q2、Q3がオン)。この状態から、U相のQ1がオンして正電圧出力モードに変化したとすると、U相の出力電位はP点の電位に変化する。U相のケーブル心線もP電位に変化しようとし、ケーブルの浮遊容量を介してケーブルシースに電流が流入する。各相のシースが変換器盤のSE点で互いに接続されていると、上述のようにU相に流れ込んだシース電流がV相のシースを通ってV相の心線に流れ、インバータに戻り、V相のスイッチング素子を通って直流中性点に戻るルートで流れる。同様にして、W相のケーブルからも中性点に電流が流れる。

### (6) 実機測定結果

鉄鋼主機ドライブでケーブルシース電流を測定した。測定時の主回路構成を図2.6.1-4に示す。モータは2巻線同期モータであり、2台の3レベルインバータにより各巻線が駆動される。各インバータの出力ケーブルは、出力VCBまでが各相 $31\text{m} \times 2$ 並列、出力VCBからモータまでが $118\text{m} \times 1$ 並列の構成となっている。ケーブルシースは、各ケーブルの両端で全相一括に束ねられた上で接地されている。VCBの両側のシースは、同一点で接地されている。図2.6.1-4中に電流の測定個所と対応する測定結果の図番を示した。測定結果を図2.6.1-5～2.6.1-10に示す。

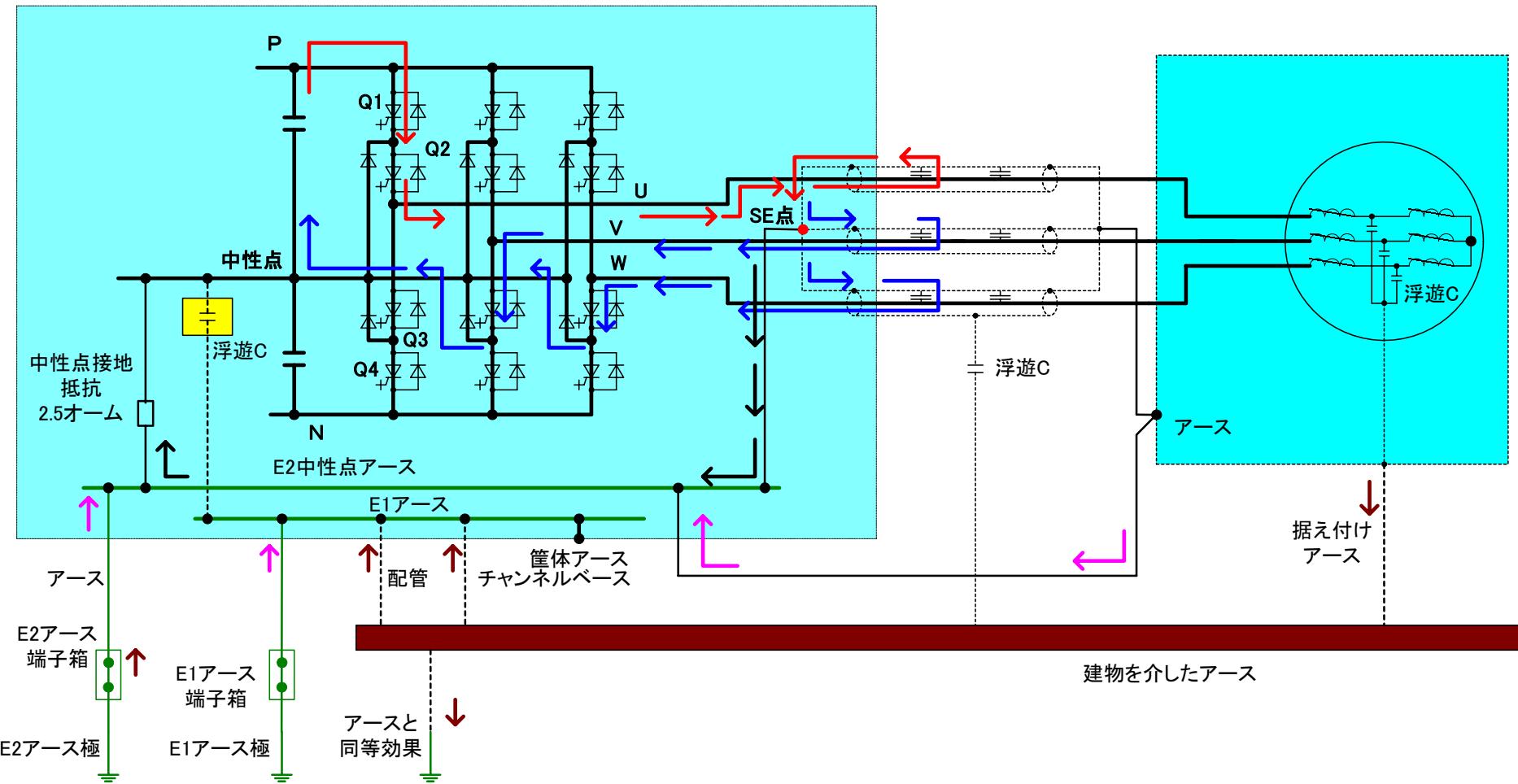


図2.6.1-3 ケーブルシース電流発生のメカニズム(IEGTインバータの場合)

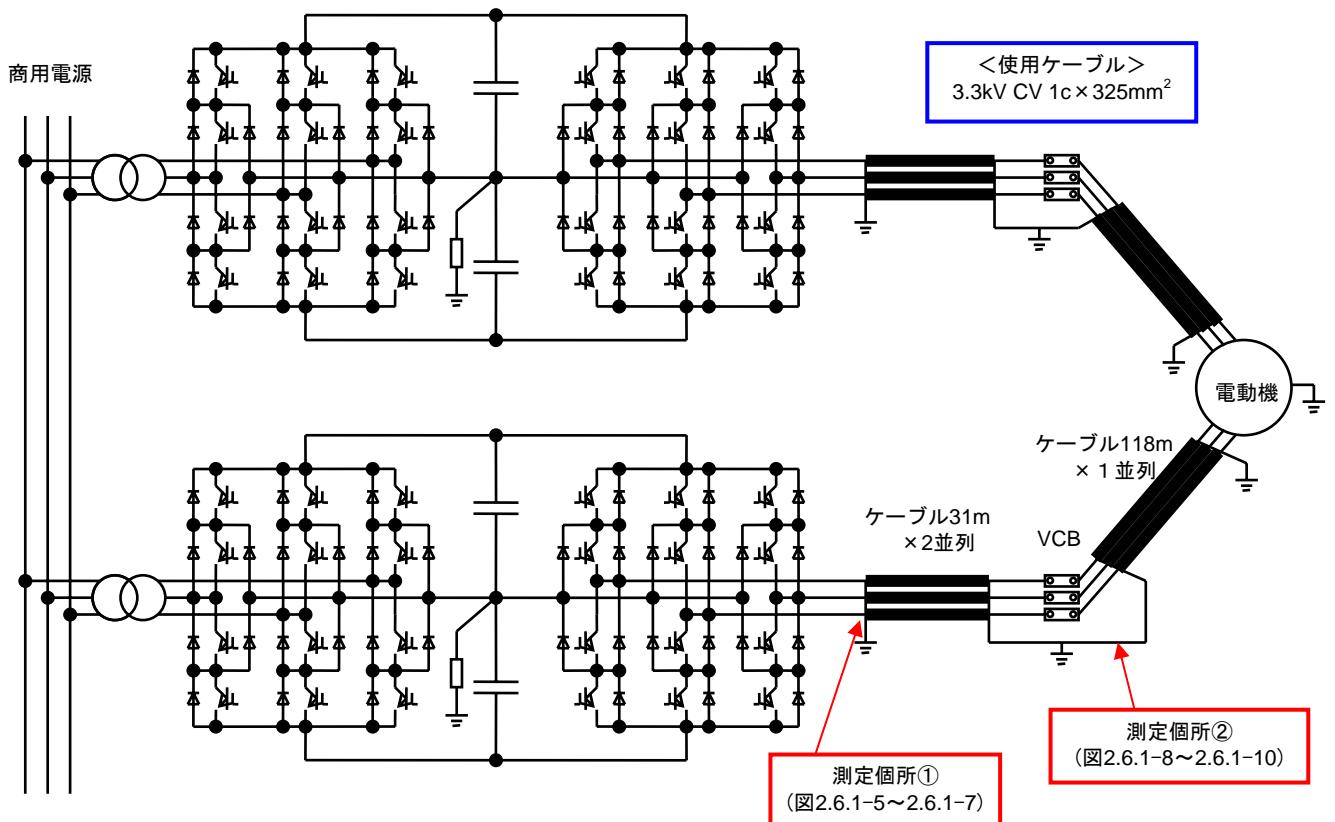


図2.6.1-4 モータ単体試験時の結線図

③2並列間の電流  
バランスは良好

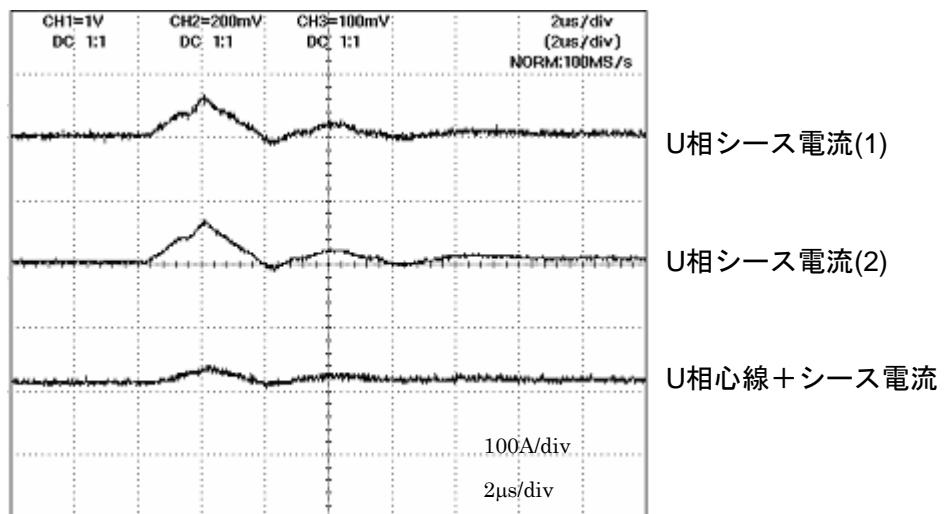


図2.6.1-5 インバータ端シース電流測定結果(U相シース1, 2, 心線+シース)

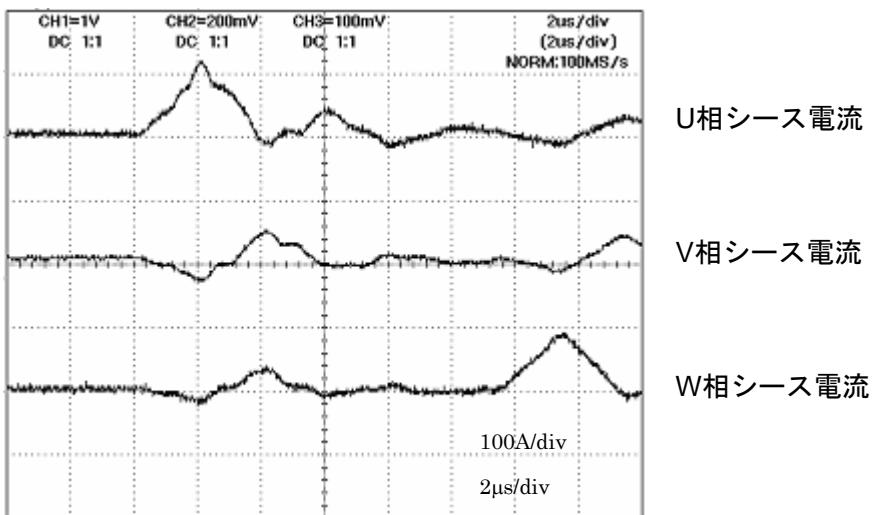


図2.6.1-6 インバータ端シース電流測定結果(U相シース, V相シース, W相シース)

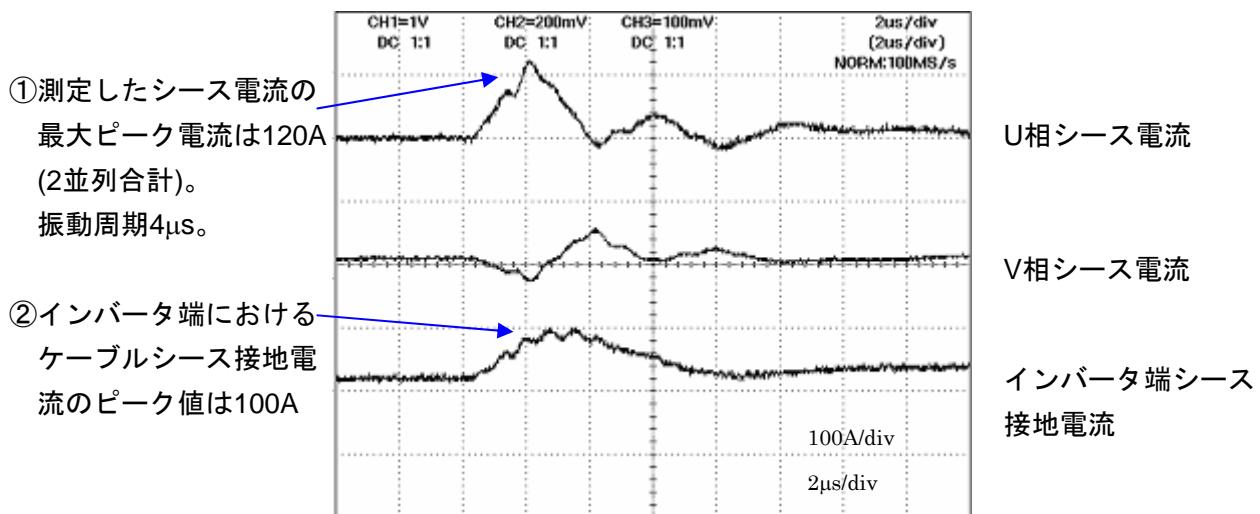


図2.6.1-7 インバータ端シース電流測定結果(U相シース, V相シース, アース)

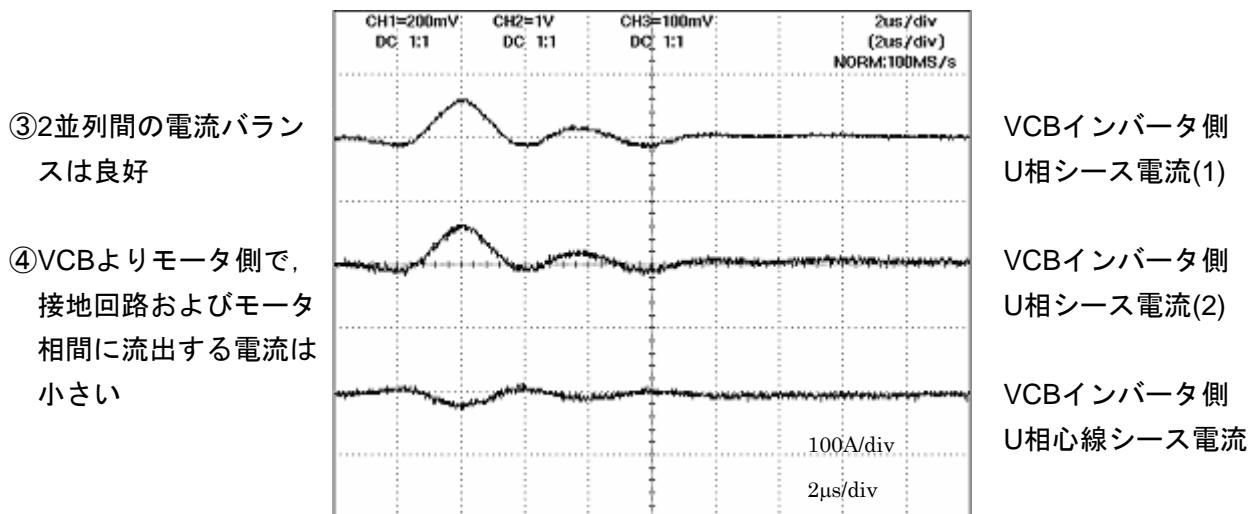


図2.6.1-8 VCB端シース電流測定結果(U相シース1, 2, 心線+シース)

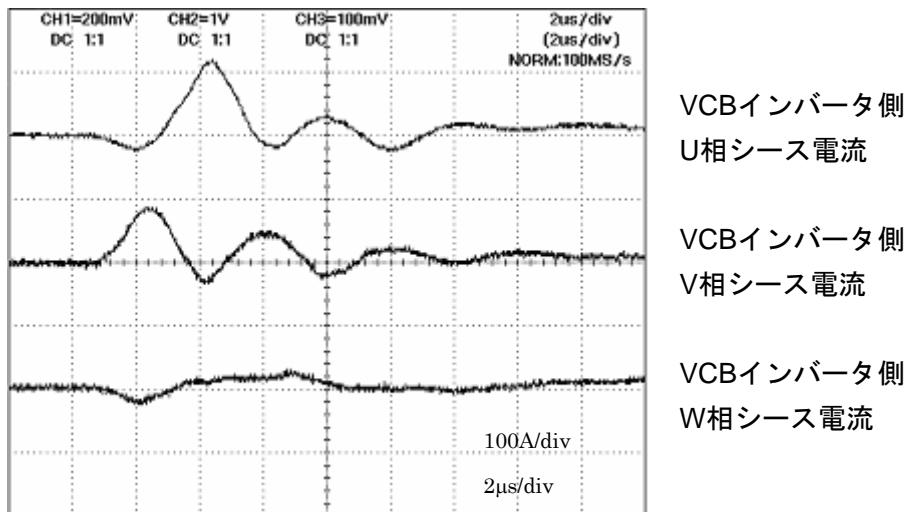


図2.6.1-9 VCB端シース電流測定結果(U相シース, V相シース, W相シース)

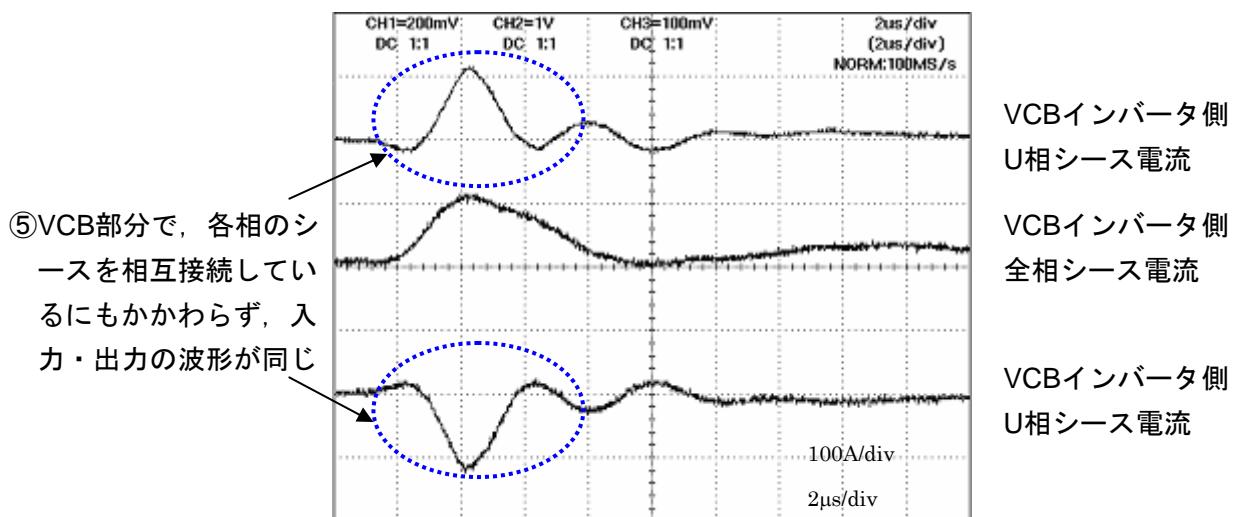


図2.6.1-10 VCB端シース電流測定結果(U相シース, 全相シース, モータ側U相シース)

## (7) 測定結果の評価

- ①測定したシース電流の最大ピーク電流は120A(2並列合計), 振動周期4μs。
- ②図2.6.1-7より, インバータ端におけるケーブルシース接地電流のピーク値は100A。
- ③図2.6.1-5及び図2.6.1-8より, 2並列間の電流バランスは良好である。
- ④図2.6.1-8の“心線+シース電流”波形より, VCBよりモータ側(118mケーブル及びモータ)で, 接地回路—モータ相間に流出する電流は小さい(心線からシースに戻らない電流のピーク値は20A)。
- ⑤図2.6.1-10より, VCB両側のU相シース電流の大きさが等しい。また, VCBでインバータ側とモータ側のすべてのシースを接続しているにもかかわらず, U相のシースに多くの電流が流れる。

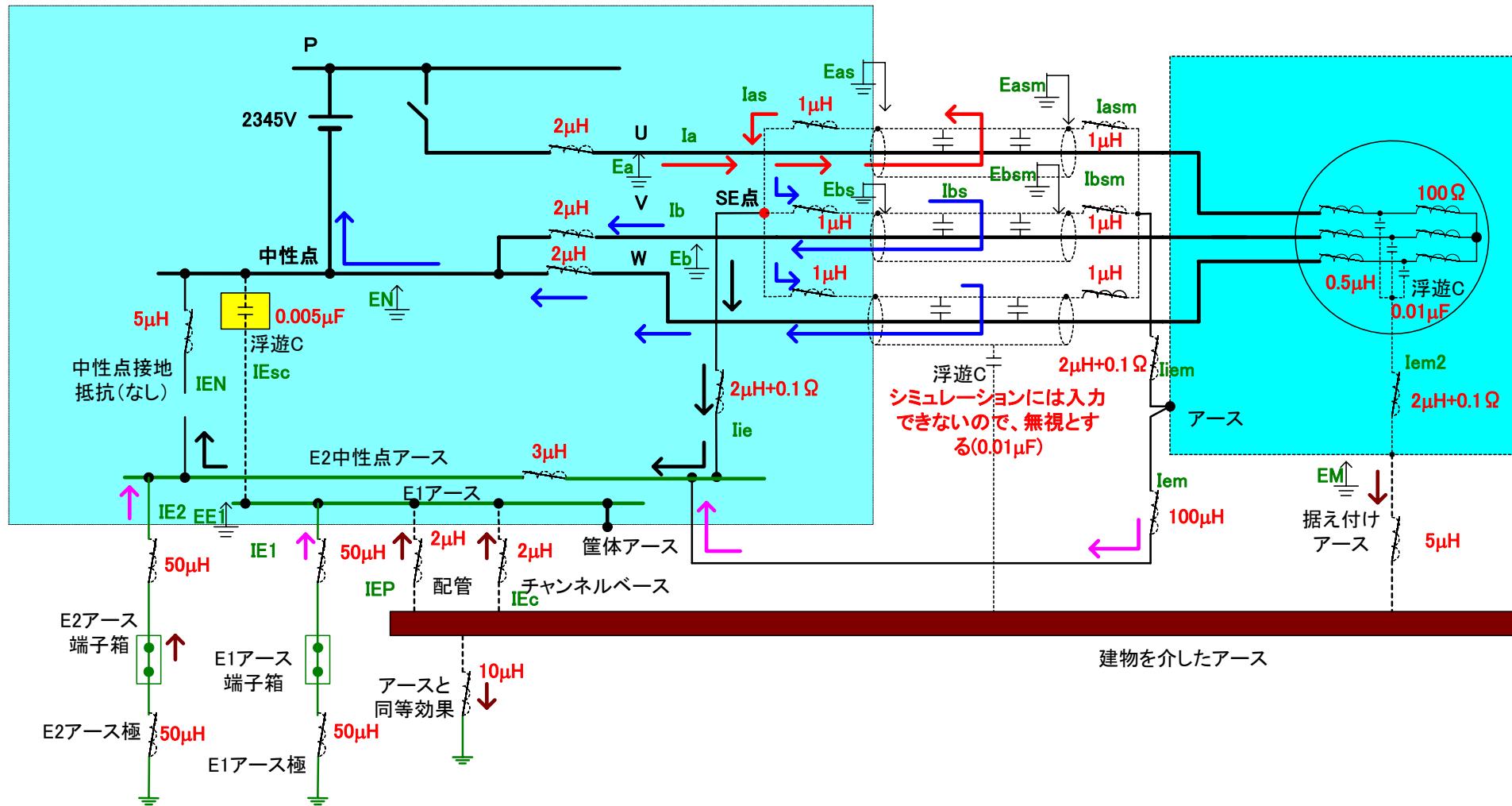
## 2.6.2 シミュレーション

### (1) シミュレータ概要

ケーブルシース電流の挙動を解析するために, 回路現象解析ツールPS CAD/EMTDC (Ver.3.0.8) を用いて解析モデルを構築した。解析モデルの概要を図2.6.3-1に示す。

3レベルインバータでモータを駆動する回路で, インバータ側のみを考えたモデルに, 三相のケーブルとモータを模擬するLR回路を基本としている。実際の施工では, 各部で接地処理をしているので, その回路も考慮した。

インバータのV, W相を中性点電位に固定し, U相のみ0V→2345Vのスイッチングを行った場合の現象について解析するものである。



- 図中の波線は、配線、構造上から来る等価的なCやLを示す。
- 実際には抵抗分もあるので、Lで記載した部分は、LR回路とみるべき。

図2.6.2-1 解析モデル1

ケーブルは、EMTDCの標準部品として入っているケーブルモデルを用いて模擬している。図2.6.2-2にケーブルモデルの設定画面を示す。導体及び誘電体の半径を設定することにより分布定数回路として模擬できるようになっている。三相ケーブルは実機に合わせ、三相巣積みのものを2並列としている。

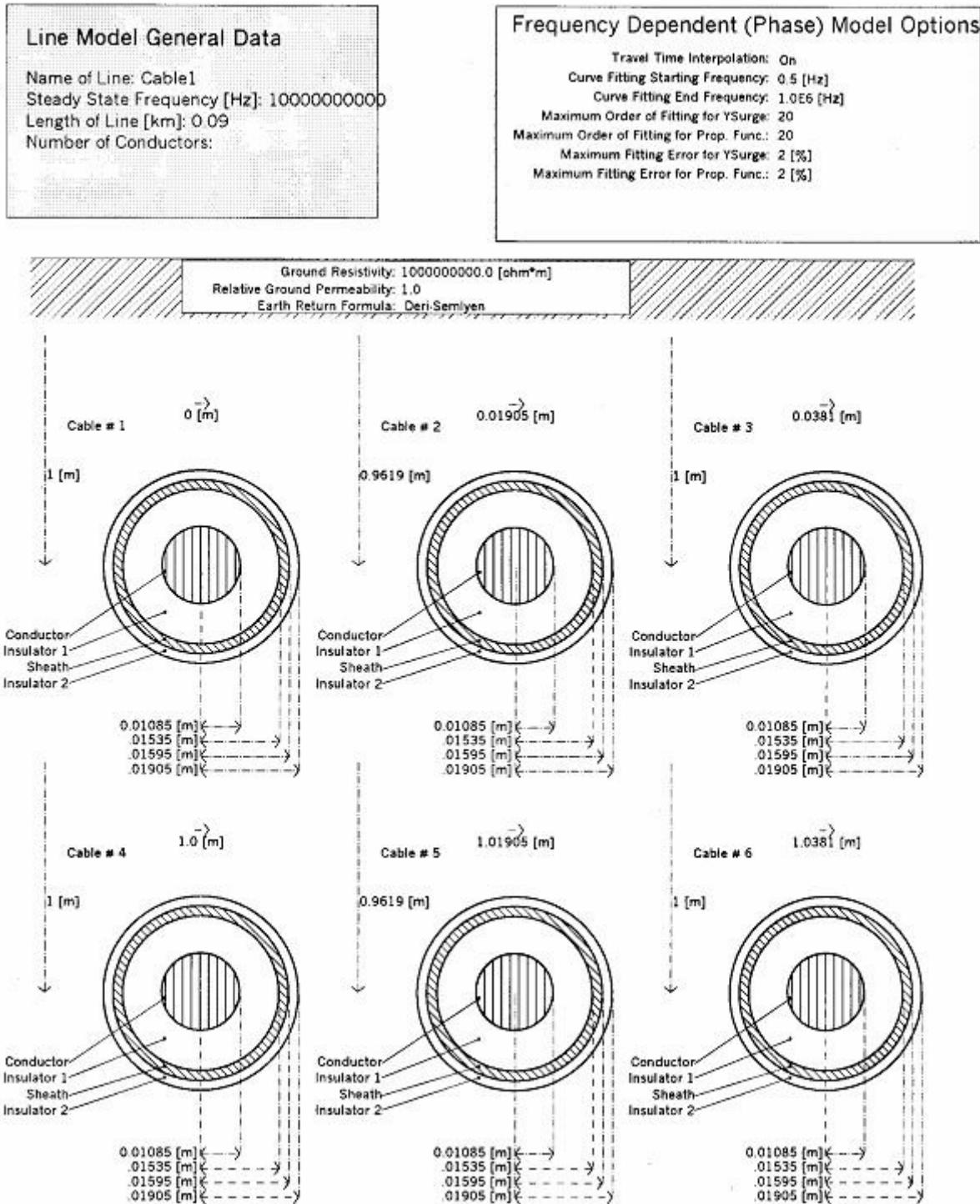


図2.6.2-2 EMTDCのケーブルモデル

## (2) モデルの修正

ここでは、ケーブル自体の特性についてはEMTDCのデータをそのまま使用し、実機と波形が異なるところを、配線のLや浮遊容量を変更し、実機データに近い特性となるように修正した。

なお、シミュレーションのシース電流のピーク値が240Aと、実機での値(120A)の2倍の大きさとなった。この要因として、実機においては高周波電流に対するダンピング分が存在するものと考えられるが、周波数特性等が不明であり、シミュレーション上でむやみにダンピング要素を加えることは得策ではないと考え、ここでは敢えて電流の大きさの違いに対しては許容するものとした。

## (3) シミュレーション結果

付図1にシミュレーション結果を示す。

シミュレーション波形のスケールは、すべて次の単位となっている。

電圧 : kV

電流 : kA

時間軸 : 秒 (10μs/DiV)

図2.6.2-3に実機波形とシミュレーション波形の比較を示す。波形比較しやすいように、時間軸を概ね合わせ、さらに振幅(縦軸)は、実機波形では2倍とした。

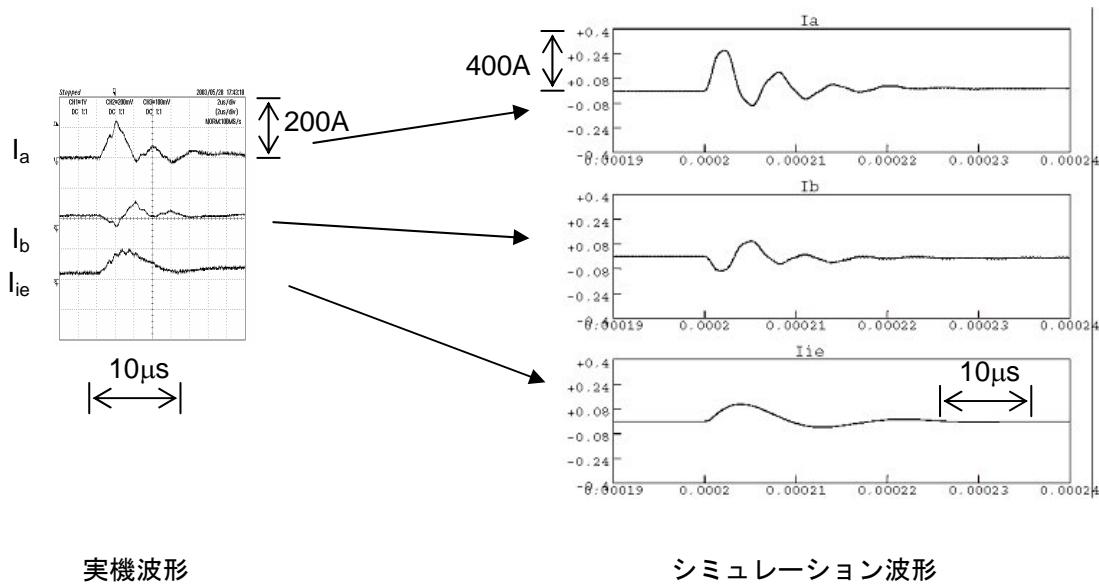


図2.6.2-3 実機波形とシミュレーション波形の比較

## (4) シミュレーション結果の考察

### ①ケーブルシース電流

ケーブルシース電流のルートについては、2.6.1 (5)を参照。

今回のケースでは、実機では120A、シミュレーションで240Aピークの浮遊容量を介した電流が確認できた。実機ではこういう100kHz程度の周波数に対して、ダンピング要素があり、そのためシミュレーション値に対して小さい電流が観測された。ダンピング要素については、もう少しデータの蓄積・検討が必要だが、シミュレーションで考慮しておけば、安全サイドといえる。

### ②ケーブル特性

シース付きのケーブルを使用していることから、心線とシースは、同軸状になっている。よって、心線と同じ電流がシースにも流れやすい。このために、U相のシース電流はU相心線電流とほぼ同じで同軸効果があるので、VCBで各相を接続しているにもかかわらず、VCBのモータ側でもインバータ側でも、ほぼ同じである。

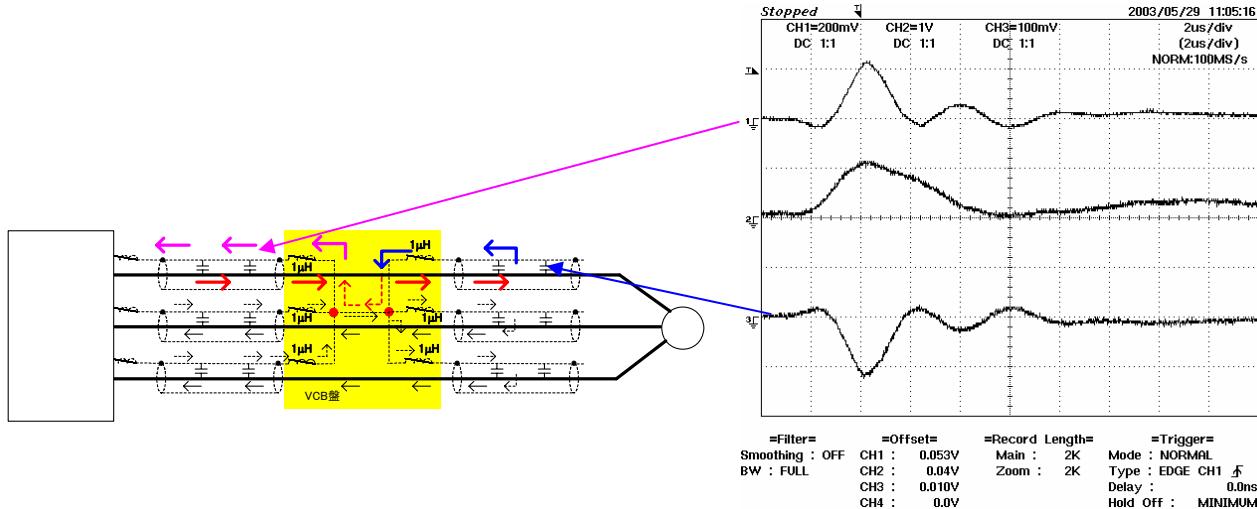


図2.6.2-4 ケーブル特性

### ③接地電流

今回のケースでは、ケーブルシースを変換器側、モータ側の両端で接地している。また、変換器の直流中性点も $2.5\Omega$ の抵抗を介して接地(E2アース)している。このため、シース電流の一部は、SE点から接地電流として中性点に戻るルートでも流れれる。

モータにも浮遊容量がある。これについても、ケーブルと同様に他相のケーブルを通って戻るルートと、フレームを介して建物のアースに流れ、変換器盤の筐体アース(E1アース)から盤内の浮遊容量を経由して中性点に戻るルートが考えられる。

ケーブルと建物間にも浮遊容量は存在するが、ケーブルと建物間に距離があることと、近接部分の面積が小さいことから、浮遊容量は小さく影響は無視できるものとした。

### ④ケーブルシース電圧

三相の対称性より、各相の出力点から変換器側ケーブルシース接続点(SE点)までのインピーダンス( $Z_{SE}$ )は等しい。したがって、図2.6.1-3に示したスイッチング条件の場合の電圧分担は、U相出力点からSE点までが $2/3$ 、SE点から中性点までが $1/3$ となる。直流電圧2345Vの場合、SE点の電位は約800Vということになる。実際には、SE点はE2アースを経由して、 $2.5\Omega$ の抵抗を介して中性点にもつながるので、この分だけSE点の対中性点電位は下がる。

## 2.6.3 構成要素の相違による影響度シミュレーション

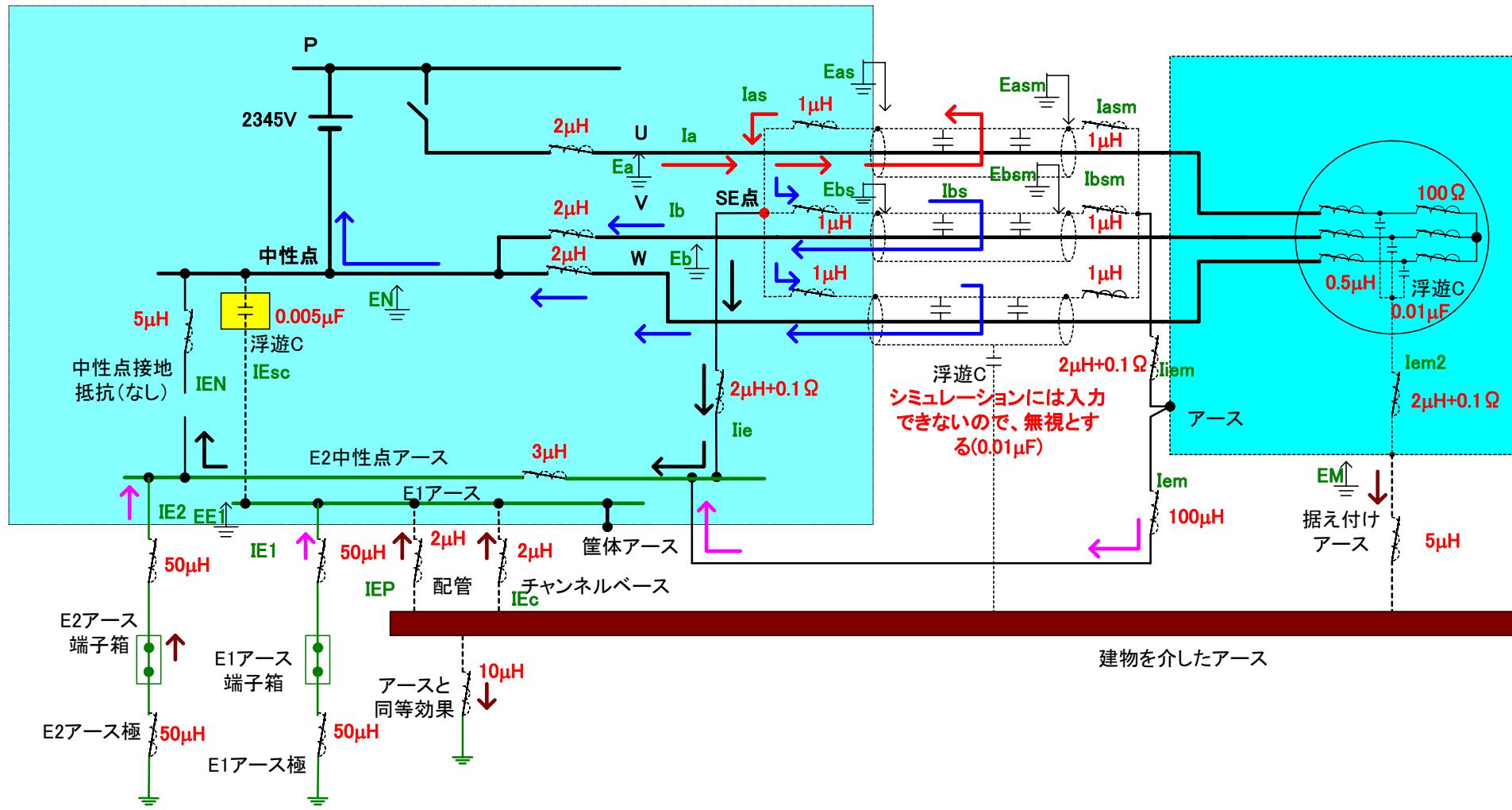
インバータの接続条件の相違によってケーブルシース電流の挙動が異なるので、条件を変えて、相違を明らかにする。

前述の回路現象解析ツールPSCAD/EMTDC(Ver.3.0.8)の条件を変えた解析モデルを図2.6.3-1に示す。

### (1) ケーブルシースの接続条件による相違

ケーブルは、100mで1本として、ケーブルシースの接続方法を変えてシミュレーションした。ここでは、中性点接地抵抗は、ないものとした。

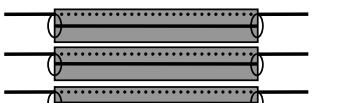
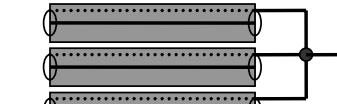
シミュレーション結果を付図2～付図8に示す。また、接続の違いによる影響のまとめを表2.6.3-1に示す。



- 図中の波線は、配線、構造上から来る等価的なCやLを示す。
  - 実際には抵抗分もあるので、Lで記載した部分は、LR回路とみるべき。

図2.6.3-1 解析モデル2

表2.6.3-1 ケーブルシース処理方法の遅配とアース電流との比較

No.	ケーブル シース接続	インバータ端 電動機端	インバータ端				モータ端		備考
			相電流 $I_A$ ( $2 \times I_b$ )	シース電流 $I_{as}$	シース電圧 $E_{as}$	盤アース電流 $I_{ie}$ ( $I_{en}$ )	シース電流 $I_{asm}$	シース電圧 $V_{asm}$	
1A	両端接地		125A ( $2 \times 60A$ )	125A	250V	2A (-)	24A	75V	ケーブルの浮遊容量を介してシースに電流が流れるが、シースを接続することで、インバータに戻る。
1C	両端オープン シースもオープ		56A ( $2 \times 27A$ )	-	1050V	- (-)	-	1350V	シースをオープンにすると、シース電圧は高くなる。
1E	両端オープン シースは相 互接続		125A ( $2 \times 62A$ )	125A	280V	- (-)	23A	120V	接地しても、しなくても、シース電流の大きさやシースの電圧に大差ない。
2A	モータ端の み接地		75A ( $2 \times 40A$ )	-	1000V	- (-)	100A	160V	浮遊容量を介して流れる電流は小さくなる。モータ端でのシース電圧は低いが、インバータ端がオープンなので電圧が高くなる。
2C	同上 インバータ 端シース相 互接続		125A ( $2 \times 62A$ )	125A	290V	- (-)	24A	100V	インバータ端のシース相互間接続で、シース電圧は低くなる。
3A	インバータ 端接地		125A ( $2 \times 62A$ )	125A	240V	2.2A (-)	-	450V	インバータ端で接地すると、モータ端を開放していても、シース電圧はそれほど高くない。
3C	同上 モータ端シ ース相互接 続		120A ( $2 \times 62A$ )	125A	240V	2A (-)	23A	90V	モータ端のシース間を相互接続すれば、モータ端のシース電圧が更に下がる。

## (2) ケーブル長の違いによるシミュレーション

ケーブルシースは、両端接続の状態でケーブル長を変えてシミュレーションした。ここでは、中性点接地抵抗は $2.5\Omega$ とした。シミュレーション結果を付図8～付図10に示す。また、接続の違いによる影響のまとめを表2.6.3-2に示す。

## (3) ケーブル並列数の違いによるシミュレーション

ケーブルの並列数を変えてシミュレーションした。シミュレーション結果を付図10(1並列)及び付図12(2並列)に示す。

並列数が増えることで、ほぼ比例して、電流が増加する。

## (4) スイッチング速度の違いによるシミュレーション

素子のタイプによってスイッチング速度が異なる。代表的なスイッチングとして、時間0(IGBTを想定)、時間 $1\mu\text{s}$ (IEGTを想定)、時間 $3\mu\text{s}$ (GCT/IGCT)で比較した。

スイッチングが遅いほど、浮遊容量を介して流れる電流は減少する。スイッチングの違いによる影響のまとめを表2.6.3-3に示す。

### 2.6.4 シミュレーションの結論

3レベルインバータにおけるケーブルシース電流の挙動について、実機測定結果に近付くようにシミュレーション上のパラメータを調整することにより、実機とシミュレーションとの整合性を高めることができた。

- ①シース間を相互接続すれば、接地しなくとも、シースの電圧は下がる。ケーブルシースをオープンにすると、シース電圧は高くなる。
- ②ケーブル並列数にほぼ比例して、浮遊容量を介して流れる電流が増える。ケーブル長が短いと、周波数が高くなる。浮遊容量を介して流れる電流は、ケーブル長が長くてもあまり変わらない。
- ③素子のスイッチング速度によって、浮遊容量を介して流れる電流は変わる。振動周波数が高いケース(配線距離が短い)ほど、大きな差になる。
- ④ケーブルの浮遊容量を介してシースに電流が流れるが、シースを接続することでインバータに戻りやすくなる(他の機器への影響が少ない)。

表2.6.3-2 ケーブル長とアース電流との比較

No.	ケーブル長 並列数	シミュレー ション結果	インバータ端				モータ端		備考
			相電流 $I_a$ 周波数	シース電流 $I_{as}$	シース電圧 $V_{as}$	盤アース電流 $I_{ie} (I_{en})$	シース電流 $I_{asm}$	シース電圧 $V_{asm}$	
4	50m 1並列	付図9	120A 330kHz	115A	230V	60A (60A)	3A	120V	長さが短くても、 $I_A$ の大きさはあまり変わらない。 長さが短いと振動周波数が高い。
4A	100m 1並列	付図10	140A 220kHz	140A	220V	75A (80A)	22A	69V	数100kHzの振動波形となる。
4B	無限 1並列	付図11	140A 10kHz以下	135A	250V	95A (95A)	0.3A	44V	長くなつても、 $I_A$ の大きさは変わらないが、振動周波数は遅くなる。
4C	100m 2並列	付図12	240A 220kHz	250A	260V	100A	7A	60V	同じ100mでケーブルが2並列になると、周波数は変わらないが、 $I_A$ がほぼ2倍になる。

※中性点は2.5Ωで接地

※ケーブルシースは両端接地

表2.6.3-3 スイッチング速度とアース電流との比較

No.	スイッチング 時間	シミュレー ション結果	インバータ端				モータ端		備考
			相電流 $I_a$ 周波数	シース電流 $I_{as}$	シース電圧 $V_{as}$	盤アース電流 $I_{ie} (I_{en})$	シース電流 $I_{asm}$	シース電圧 $V_{asm}$	
5	0μs	付図13	150A 300kHz	150A	640V	75A (75A)	8A	240V	スイッチング時間が早いと浮遊容量を介した電流 は大きくなる。 シース電圧も高くなる。
4A	1μs	付図10	140A 220kHz	140A	220V	75A (80A)	22A	69V	
5B	3μs	付図14	85A 150kHz	83A	80V	70A (70A)	2A	24V	スイッチングが遅いと影響は小さい。

※中性点は2.5Ωで接地

※ケーブルシースは両端接地

※ケーブル長は100m(1本)

## 2.7 EMC観点での高圧インバータ使用ケーブルの接地方式の検討

最近の可変速駆動システムに関する規格は、IECの思想が取り入れられている。これらの規格では、ドライブ装置が発生するEMCを考慮した表現が見られる。

### (1) 関連規格

JEC-2451-2002	直流可変速駆動システム
JEC-2452 -2002	低圧交流可変速駆動システム
JEC-2453 -審議中	高圧交流可変速駆動システム
IEC 61800 -1:1997	Adjustable speed electrical power drive systems - Part 1: General requirements - Rating specifications for low voltage adjustable speed d.c.power drive systems
IEC 61800 -2:1998	Adjustable speed electrical power drive systems - Part 2: General requirements - Rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems
IEC 61800 -3:2004	Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods
IEC 61800 -4: 2002	Adjustable speed electrical power drive systems - Part 4: General requirements – Rating specifications for a.c. power drive systems above 1000 V a.c and not exceeding 35 kV

### (2) 規格中の接地方式に関する規定

IEC 61800-4では、“Equipotential bonding of main components(等電位ボンディング)”の概念に従い、各機器の筐体及びシールドを接地幹線に接続して電位を等しくする概念が示されている。その目的は、

- ・コモンモードノイズの低減
- ・EMC

である。

これによると図2.7-1のように、変圧器、変換器及びモータは、接地線で同電位に結ばれる必要がある。この考えは電気設備基準のA種、B種、C種と接地の種類ごとに接地を分離する考え方と若干相反する点も見受けられる。

変換器の接地方法は、抵抗接地、容量性接地、直接接地などがあるが、主回路及び筐体は接地母線に接続される。

シールド線も両端を接地する場合は図2.7-1のようになるが、変換器により片側を浮かすこともあることが触れている。シールド線の接地方式はインバータ本体の主回路接地方式とも関連するので、各メーカーでインバータ装置とケーブルシールド接地方式を検討し、装置にあった接地方式を採用することが望まれる。

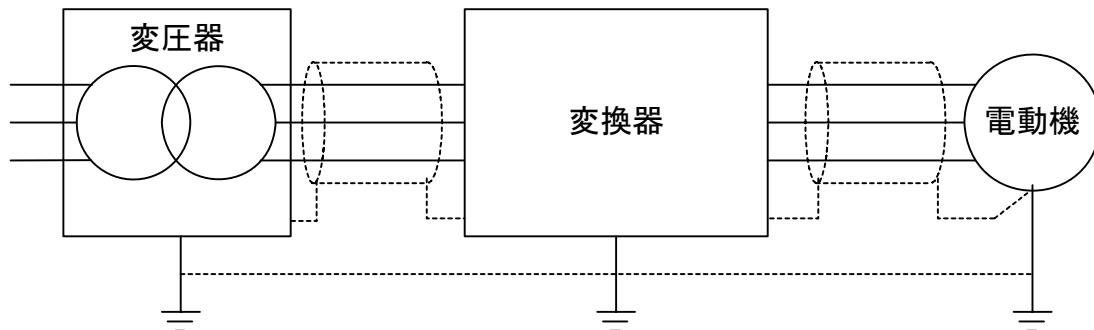


図2.7-1 主回路機器とシールドケーブルの設置方法の一例

### (3) ケーブルシースの接地方法

インバータ装置でモータを駆動すると、ノイズによる誤動作、モータ及び機械の軸受け(ベアリング)の電食、及び周辺の他の機器への悪影響が発生することがある。これらの問題点を軽減するためには、配線施工基準が各社で検討され、定められている。

最近のわが国におけるPWM変換器のケーブルシースの接地方法については、2.1のように各社で違いがあることが分かった。この違いは、各ドライブ装置固有の特徴と過去の経験を考慮して決められており、各方式の施工要領が明確であれば、これらの方針を統一する必要はないと思われる。

今回の調査では、ケーブル周りの電界強度の測定はされていない。しかし、3. で述べるように、シールドケーブルの採用はEMCノイズ低減に効果があり、そのシールドは、しかるべき方法で接地されるべきである。

各接地方式のケーブルシース電流、電圧の特徴は、2.6を参照いただきたい。

## 3. 低圧インバータ使用ケーブルの技術動向と高圧インバータ使用ケーブルの技術動向

### (1) 低圧インバータケーブル

使用ケーブルの種類は、標準で入手できるケーブルに影響される。低圧インバータに関しては、海外では3線アース線付3線一括シールド付ケーブルを使用することが推奨されているが、日本国内では入手困難である。日本では、従来はシールドなしケーブルが使われていたが、EMCの観点で、最近では3心又は単心シールドケーブルが使用されるようになってきた。

PWMインバータに適したケーブルとその施工方法については“Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives (John Bentley等, IEEE Transactions on Industry Applications 1997)”で発表されて以来、各種の検討がなされている。

この論文で推奨されているケーブルの例を以下に示す。

#### ① 3心の接地ケーブルを含む3心シールドケーブル(銅又はアルミシールド)

このケーブルは、三相主回路と、3心の接地線(PE)がシールドに巻かれている。接地線が3心あるのは、各相の主回路に対し接地線が対称に配置させるためで、心線が1心の場合、各相の分布インダクタンス、分布容量が非対称になるためノイズが増加する。

3心の接地線は、機器接地の目的のほか、主回路を伝播するサージの帰路として働くためノイズの拡散が抑えられる。

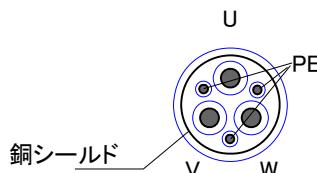


図3-1 3心の接地ケーブルを含む3心シールドケーブルの例

#### ② 3心銅シールドケーブル(ただし、銅シールドは通常より厚いもの)

このケーブルでは、通常のケーブルより断面積の大きいシールドを用いることで、シールドのインピーダンスを下げ、ノイズの拡散を防止する。

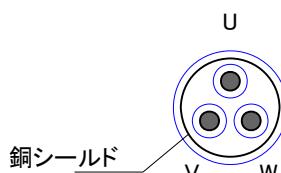


図3-2 3心銅シールドケーブルの例

注：シールドケーブルの導電率は、各相の導電率の50%以上とする。

シールドは、同心円とする(各相対称)。

③ シールドケーブル又は鉄アーマードケーブル

3心保護外皮付きシールドケーブルを使用するとき(保護外皮の導電率は主導体の50%以下。)。

この例が、日本のシールドケーブルに最も近い。この場合、シールドの断面積が小さく導電率が低いため、シールドケーブルと並行して接地線をモータから変換器に引くことを推奨している。

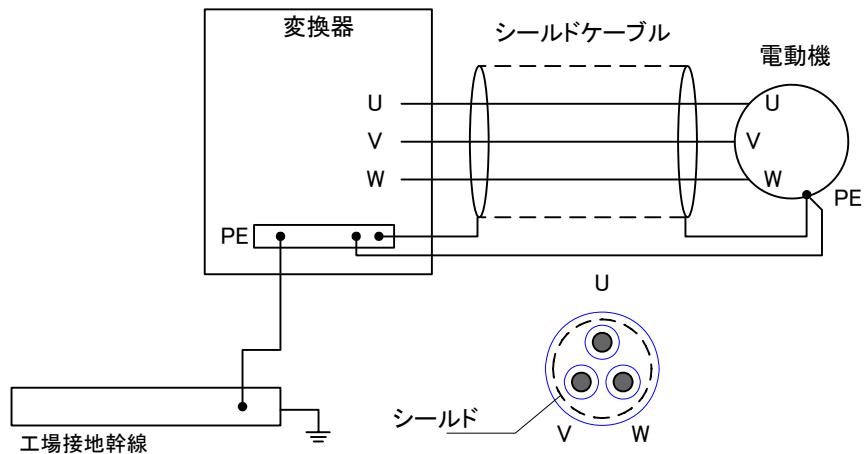


図3-3 シールドケーブル又は鉄アーマードケーブルの例

(2) 高圧インバータ用ケーブル

日本では、従来から高圧ケーブルには銅テープシース付のシールドケーブル(CVケーブル)が使われている。しかし、銅テープシースは、通常その片端を接地し、ケーブル外皮の電位を対地と同じにする目的であった。近年、高圧PWMインバータが登場し、この同じケーブルがPWMインバータでも使用されているが、低圧インバータと同様にインバータのスイッチングによるサージで生じるノイズの拡散を低減することにもシースが有効であり、EMCの観点からも効果があることが分かっている。

先に述べたように、低圧インバータ用EMCケーブルの場合、ケーブルを3心+3アースの構成などとし、アースケーブルの断面積を主回路1相の1/2以上取っている。海外においては、3心+3アースの高圧ケーブルが実際に施工されている例はある。しかし、このような構造をもつ3心の3kV級以上の高圧インバータ用標準ケーブルは、国内はない。

シースに流れる電流の観点からは、3心ケーブルの施工が望まれる。しかし、高圧ケーブルはケーブル断面積が大きくなると曲げにくく施工が難しくなるので、海外でも単心ケーブルを敷設している例も多い。図3-4の写真は、欧州で実際に使用された高圧ケーブルの断面である。通常の銅箔シールドの外側に接地導体が追加されて、アース側の断面積を増やしている。

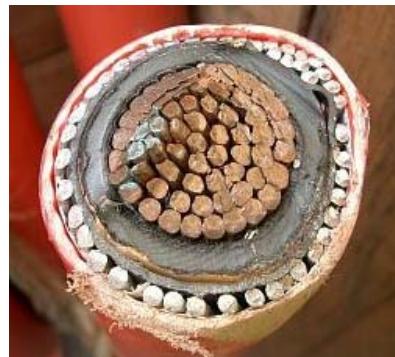


図3-4 高圧ケーブルの断面例

高圧ケーブルの場合、絶縁が厚くなるため、3心ケーブルを使った敷設は工事上難しい。このため、国内では単相ケーブル3本をよったトリプレックスと呼ばれるケーブル(CVTケーブル)又は単相ケー

ブル3本をトレーの上に俵積みして敷設される。

日本で通常使われている銅テープシールドをもつ3又は6kV級CV, CVTケーブルのシールド断面積は、主回路の断面積に比べると小さく、シースに流れる電流による発熱を検討しなくてはならない。しかし、実測したシース電流から算定すると、シース電流はパルス状の電流のため、その最大値は大きくとも実効値的には小さく、発熱は問題ないことが調査で判明した。

また、シース電位もシース外皮のビニールで想定している600Vを超える電圧がPWMのスイッチング時パルス状に印加されても、その寿命は十分長く、問題がないことが加速試験で判明した。

以上より、3又は6kV級CV, CVTケーブルは、今後PWMインバータの主回路ケーブルとして使用していくことが可能である。ただし、海外ではPWMインバータ用のケーブルも開発されており、将来、国内においてもこのようなケーブルが用いられるることは望ましい。

#### 4. WG活動内容

冒頭に述べたとおり、今回の報告書はWGで16回の会合を重ね、まとめたものである。ここでは、各回の主な審議内容を紹介する。

開催回数	日時	主な審議内容	出席者
第1回	2002年 2月4日	<ul style="list-style-type: none"><li>・WG発足趣旨・経緯説明</li><li>・検討項目として次の5項目を挙げ、まずは1)～3)について検討を進めることを決定<ul style="list-style-type: none"><li>1) シールドへの印加電圧の抑制方法</li><li>2) シース電圧の人体への影響の検討</li><li>3) EMCの観点での高圧インバータの接地基準の検討</li><li>4) ケーブル劣化時のFMEA</li><li>5) 高圧ケーブルの予防保全</li></ul></li><li>・測定データの紹介</li></ul>	溝口 小玉 飛世 佐久間 高野 谷口 増田 赤木
第2回	2002年 4月12日	<ul style="list-style-type: none"><li>・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(各社の接地方式の比較)</li><li>・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討)</li><li>・シース電圧の人体への影響(情報収集)</li></ul>	小玉 飛世 木下 佐久間 谷口 細田 増田
第3回	2002年 6月17日	<ul style="list-style-type: none"><li>・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(IECドラフトでの規定の確認)</li><li>・シールドへの印加電圧の抑制方法(実測・シミュレーションデータの検討)</li><li>・シース電圧の人体への影響(情報収集)</li></ul>	溝口 飛世 木下 佐久間 谷口 細田 増田 赤木
第4回	2002年 8月26日	<ul style="list-style-type: none"><li>・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(シミュレーション結果による検証)</li><li>・シールドへの印加電圧の抑制方法(実測・シミュレーションデータの検討)</li><li>・シース電圧の人体への影響(情報収集)</li></ul>	溝口 木下 佐久間 高野 谷口 細田 赤木

開催回数	日時	主な審議内容	出席者
第5回	2002年 10月21日	・シールドへの印加電圧の抑制方法(接地方式による抑制効果の比較、実測・シミュレーションデータの紹介)	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 高野 細田
第6回	2002年 12月3日	・シールドへの印加電圧の抑制方法(接地方式による抑制効果の比較、実測・シミュレーションデータの検討、既設ケーブルの取扱い、予防保全の項目選定、IEC規格での規定の確認)	溝口 飛世 佐久間 高野 細田 増田 谷口 赤木
第7回	2003年 2月7日	・三菱電機 電力・産業システム事業所工場見学 ・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(IECの動向確認) ・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討、予防保全の項目選定) ・シーズ電圧の人体への影響(WGとしての方針決定)	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 高野 細田 増田 谷口
第8回	2003年 5月16日	・東芝府中事業所工場見学 ・シールドへの印加電圧の抑制方法(実測・シミュレーションデータの検討、ケーブル経年時の影響)	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 高野 細田 谷口
第9回	2003年 7月7日	・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討、ケーブル経年時の影響に関する電線総合技術センターのヒアリング) ・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(IEC規格での規定の確認)	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 細田 増田 谷口 赤木
第10回	2003年 9月12日	・日立製作所(情報制御システム事業部)工場見学 ・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討、ケーブル経年時の影響) ・EMCの観点での高圧インバータの接地基準(各社の接地方式の比較)	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 細田 増田 谷口
第11回	2003年 11月7日	・富士電機機器制御・富士電機システムズ 神戸工場見学 ・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討、電線総合技術センターへの依頼試験方法、IEEEの論文紹介)	溝口 飛世 木下 佐久間 細田 谷口
第12回	2004年 1月23日	・安川電機 行橋工場見学 ・シールドへの印加電圧の抑制方法(シミュレーションデータの検討、動力ケーブル選定の考え方、	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間 高野 細田 増田 谷口

開催回数	日時	主な審議内容	出席者
第13回	2004年 3月25日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シールドへの印加電圧の抑制方法(三菱先端総合研究所での調査報告、電線総合技術センターへの依頼試験項目、シミュレーションデータの検討、動力ケーブルの考え方)</li> <li>・シーズ電圧の人体への影響(情報収集、WGとしての方針決定)</li> <li>・成果物の位置付け</li> </ul>	溝口 小玉 飛世 高野 谷口 赤木
第14回	2004年 7月7日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書の作成(項目の決定、案の作成)</li> </ul>	溝口 小玉 飛世 木下 佐久間
第15回	2004年 10月19日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書の作成(内容審議)</li> </ul>	溝口 小玉 飛世 細田 増田
第16回	2005年 1月27日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・報告書の最終まとめ</li> </ul>	溝口 小玉 飛世 高野 佐久間 谷口

## 5. おわりに

本WGの活動も約3年を経て、当初の目的であった高圧インバータで採用しているケーブル(CV, CVT)のインバータスイッチングサージによるシーズ寿命に関する検討から、これらのケーブルに関して今後も継続して使用できる目処を得たことは特筆すべき結果といえる。なお、電線メーカー各社には個別に種々技術相談しながら検討を進めたが、CV, CVTの生い立ち経緯(商用電源用途)からシーズに関する絶縁寿命の技術的データがなく、ケーブル使用側のインバータ製造メーカー各社で検討を進めたという経緯を記載しておきたい。

本WGは、高圧インバータメーカー各社に参画を御願いして実現したものであるが、検討を進めるうちにEMC観点での検討など低圧インバータに関する動向の確認も必要となり、高圧/低圧ケーブルの採用基準、接地基準にまで検討項目が発展するなどその検討範囲が広がりを見せ始めた。

すべての技術範疇を検討する目的で発足したWGではないため、議題を高圧インバータ用途に限定した活動に舵取りしながら、高圧インバータ適用時の高圧ケーブルの採用技術課題、その検討、今後の施工工事基準に指針を与えることをその目的とし、今日に至っている。

高圧インバータでは、大概の場合その装置容量が大きく、EMCなどの検討に必要なデータ採取が困難だったが、基礎データは参加いただいたメーカーにて採取し、そのデータはシミュレーション検討にて評価してきた。その結果により、EMC観点も考慮したケーブル敷設時の接地工事基準の指針を答申できたことも今回のWGの大きな成果として評価したい。なお、この指針はあくまで望ましい形ではあるが、採用する主回路によって判断すべき項目でもあり、各社の基準を統一することがその目的ではないので注意が必要である。

最後に、当WG設立当初から最後まで熱心にご協力、ご尽力いただいた関係者各位に感謝の意を表したい。このWGの検討結果が少しでも高圧インバータメーカー及びユーザに対して技術的な検討指針を与えることができれば幸甚である。