

SiCインバーター・モーター製品の絶縁基盤技術

石川裕卓*
Hirofuku Ishikawa
門脇和丈†
Kazutake Kadowaki
宮路仁崇*
Yoshitaka Miyaji

遠藤和樹*
Kazuki Endo

Electrical Insulation Technologies for SiC Inverter-Motor Systems

*先端技術総合研究所(工博)
†パワーデバイス製作所

要 旨

SiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスを搭載したインバーター・モーターシステムの社会実装は、近年ますます進んでいる。機器のSiC化に伴って、スイッチング駆動周波数の増加、電圧立ち上がり速度の高速化、サージ電圧の上昇などが生じることは、電気絶縁に対して不利に働く要素になる。また電動化の広がりに伴って、従来製品では信頼性が保証されていないような環境への対応が求められることもある。これらの状況下で製品の絶縁信頼性を確保していくためには、製品開発時の絶縁設計技術から、運用後の状態監視技術までを網羅した、絶縁基盤技術全体の高度化が必要である。三菱電機は、特にSiCを搭載するパワーエレクトロニクス機器向けに絶縁技術を開発した。

1. ま え が き

近年、SiCパワーデバイス製品のラインアップ拡充が進んできたことで、幅広い分野のインバーター・モーターシステムでSiCが採用されるようになってきた。機器のSiC化によってインバーターの損失低減や、小型・大容量化といったメリットがある一方で、図1に示すようにスイッチング駆動周波数の増加、電圧立ち上がり速度の高速化、サージ電圧の上昇などは製品の電気絶縁に対して不利に働くことが知られている。更に信頼性の高い製品を開発するためには、部分放電や空間電荷などの電気絶縁に関与する現象を、従来以上に詳細に理解する必要がある。また、SiCの普及とともに、先行する電車・電気自動車だけでなく、航空機や船舶などでも積極的な電動化開発が進められている。特に航空機では、軽量化の観点からSiCの採用可能性が高いが、航空機搭載機器には極めて高い信頼性が要求される。それに加えて、高高度の低気圧環境は放電発生リスクが高いため、部分放電を発生させない絶縁設計技術に加えて、放電発生を検知する状態監視技術が重要である。

これらのことから、絶縁設計から運用中の状態監視に至る包括的な絶縁基盤技術の高度化が、安心・安全な製品開発の前提になる。本稿では、特にSiCを搭載するインバーター・モーター製品向けに開発した四つの絶縁技術を述べる。

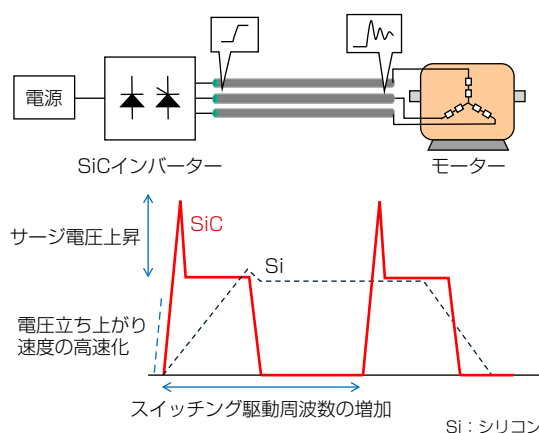


図1-SiCインバーター・モーターシステムと高電圧スイッチング波形の模式図

2. SiCインバーター・モーターの絶縁技術

この章では、SiCインバーター・モーター製品向けに開発した四つの絶縁技術について述べる。

2.1 高速矩形波によるモーターの放電評価技術

インバーター素子のスイッチングによって発生するサージ電圧(図1のスイッチング波形の模式図)は、インバーターとモーターをつなぐケーブルを介してモーター端子に届く過程でLC共振やモーター端子-インバーター間の反射によって増幅される。その結果、モーター端子にはインバーター素子で発生したサージ電圧以上の大きな過電圧が発生することが知られている。そして、このような急峻(きゅうしゅん)な電圧がモーター巻線に輸入された場合、巻線間に電位差が発生し、部分放電が発生する可能性がある。部分放電はモーター巻線を劣化させて、最終的に絶縁破壊を引き起こすため、モーター絶縁での大きな課題になっている⁽¹⁾。特にSiC化によって巻線に与えるストレスは高まっており、当社では、SiCインバーターで駆動するモーターの絶縁信頼性を評価するため、サージ電圧を模擬した高速矩形(くけい)波電圧を巻線に印加した場合の部分放電評価技術及びシステムを開発・構築した。

部分放電とは、気中で生じる微小な放電のことであり、急峻な電気信号として観測される。そのため、商用周波数で使用される電力機器等では、印加電圧波形と放電波形の周波数成分が異なることを利用し、選別・増幅することで部分放電を測定するのが一般的である。一方、サージのような急峻な電圧波形が印加される場合、サージ電圧波形と放電波形の周波数成分による切り分けが困難になるため、従来手法では部分放電の測定が難しいという課題がある。そこで当社では、部分放電発生時に生じる微小発光を利用した部分放電検出システムを構築した。図2に高速矩形波によるモーター巻線の部分放電評価システムを示す。この評価システムでは、矩形波電源からサージ電圧を模擬した高速矩形波電圧を巻線試料に印加する。高電圧プローブで印加電圧をモニターしながら、放電光を光電子増倍管で捉えることで部分放電の有無を評価する。図3に部分放電の評価例を示す。矩形波電圧が印加されている最中に光電子増倍管が反応しており、部分放電の発生を確認できる。この評価システムに採用した矩形波電源は、スイッチ部がSiC素子で構成されて、またパルス数・パルス幅・繰り返し周波数が広い範囲で可変であるため、SiCインバーターから出力されるサージ電圧を模擬可能である。それに加えて、電圧レベルのシーケンス制御が可能であるため、IEC/TS 61934 Ed.3.0の定義に基づいて、部分放電開始電圧(PDIV)及び繰り返し部分放電開始電圧(RPDIV)も簡便に評価可能である。この評価技術を用いて、SiC駆動モーターの絶縁信頼性向上を目指した研究開発を進めている。

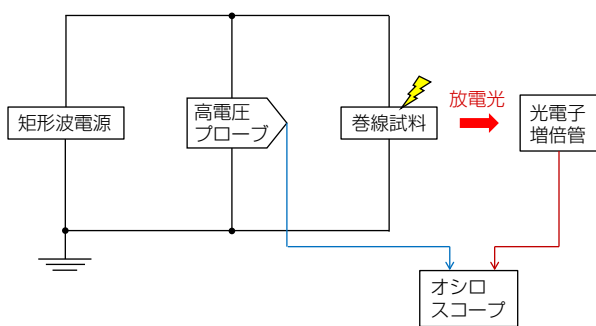


図2-高速矩形波による巻線部分放電評価システムの構成

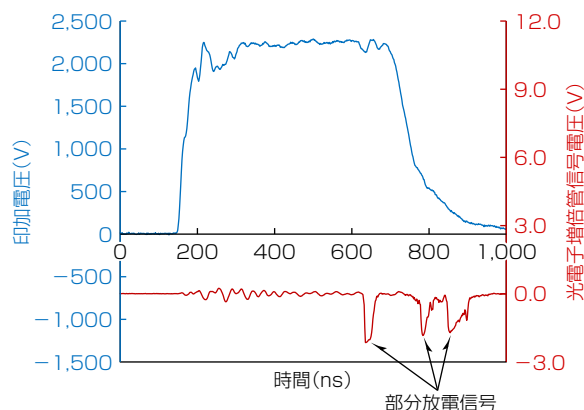


図3-部分放電の評価例

2.2 パワーモジュール製品の高速矩形波による絶縁寿命評価技術

パワーモジュール内部の絶縁材料は単極性的高速矩形波の電界ストレスを受けている。直流電圧から高周波まで幅広い周波数成分が組み合わせられるため、様々な劣化現象を同時に考慮することが必要になる。従来は交流電圧又は直流電圧を用いた長期課電試験で製品の絶縁寿命を評価していたが、実際の電界ストレスに近い高速矩形波を用いれば、絶縁寿命を更に高精度に評価できると考えられる。そこで高速矩形波による絶縁寿命評価技術を開発し、パワーモジュールの封止樹脂

脂として広く用いられているエポキシ樹脂に対して適用し、従来手法の結果と比較した。

図4に、開発した高速矩形波による絶縁寿命評価システムを示す。試料に正極性の矩形波電圧を課電し、課電開始から絶縁破壊までの時間を測定することによって、絶縁寿命を評価する。また、試料に並列接続したコンデンサーの容量を調整することで、矩形波の立ち上がり時間を可変とした。従来手法との比較のため、エポキシ樹脂封止した針-平板電極系の要素モデルを用いて、絶縁寿命を評価した。矩形波の立ち上がり時間には、SiCインバーターを想定した25nsとSiインバーターを想定した200nsを設定した。図5に評価結果を示す。塗り潰しは絶縁破壊したプロット、白抜きは試験を打ち切った絶縁破壊に至っていないプロットである。図5から、立ち上がり時間25nsで絶縁破壊に至った条件が、立ち上がり時間200nsの場合は絶縁破壊せず、矩形波電圧の立ち上がり時間が短いと絶縁寿命が短くなることが分かる。高電界になる針電極先端近傍では、電界強度があるしきい値を超えると電極から空間電荷が注入されて蓄積することで、徐々に電界を緩和することが知られている。しかし、立ち上がり時間が短い場合にはこの電界緩和効果が十分に発揮されない。これによって、立ち上がり時間が短いと同じ印加電圧でも電界ストレスが高くなり、その結果、絶縁寿命が短くなったと考えられる。このように、SiC搭載機器での絶縁現象の把握には、空間電荷の影響を考慮することも重要と考えられる。SiC搭載機器での絶縁現象を把握するための評価技術について2.3節で述べる。

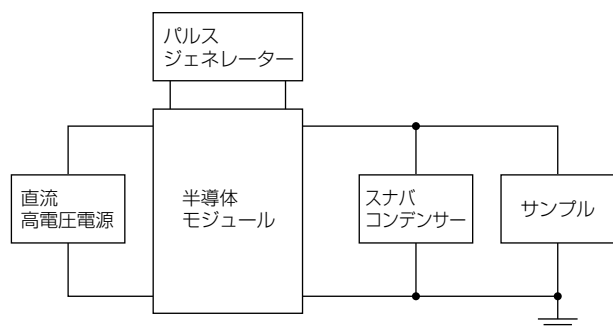


図4-高速矩形波による絶縁寿命評価システム

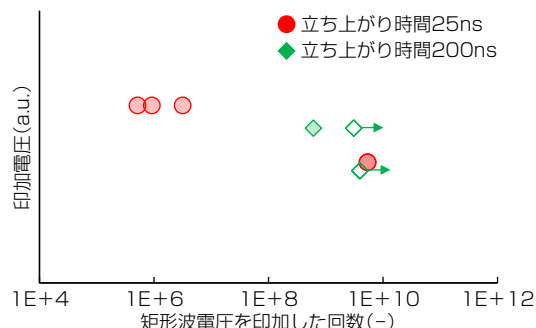


図5-高速矩形波によるエポキシ樹脂の絶縁寿命

2.3 絶縁材料の高速矩形波電圧下の空間電荷分布評価

2.2節で述べたように、高速矩形波電圧下の絶縁現象の把握には、絶縁材料内部に存在する空間電荷を考慮することが重要だと考えられる。直流電圧下の空間電荷分布の評価方法は、パルス静電応力 (Pulsed Electro Acoustic : PEA) 法が代表例として知られている。PEA法は、試料にパルス電圧を印加することで試料内の空間電荷に起因する圧力波を発生させ、その圧力波を圧電素子によって測定することで、試料内の空間電荷の分布を測定する手法である。当社でも、直流電圧下ではその手法を用いて絶縁材料の評価を行ってきた。高速矩形波電圧下の評価技術は、近年開発されつつある⁽²⁾。そこで当社は、その手法の開発を進めている東京都市大学と共同研究を行い、高速矩形波電圧下の評価方法の高度化を進めている。

図6に高速矩形波電圧下の空間電荷分布評価システムを示す。また、図7に高温中のエポキシ樹脂に対して、矩形波電圧下の空間電荷分布を評価した一例を示す。図7から、印加する電圧条件によって電荷の蓄積位置や分布形状が異なるこ

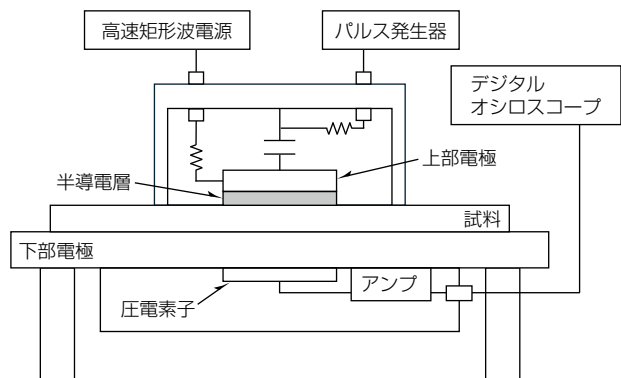


図6-PEA法を用いた空間電荷分布測定システム

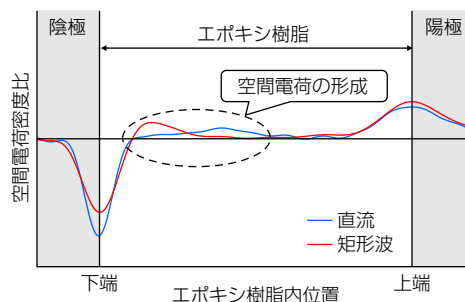


図7-エポキシ樹脂の空間電荷分布波形

とを確認できる。これは、直流電圧印加時には電界が連続的に作用するのに対して、矩形波電圧印加時には電圧の立ち上がり・立ち下がりや印加時間の周期的変化を伴うため、電荷の注入、輸送、蓄積及び緩和の過程が変化し、結果として空間電荷挙動が異なるためだと考えられる。この評価方法によって、当社製品に用いられる絶縁材料で、印加電圧波形や周波数が空間電荷挙動に与える影響を評価可能である。

2.4 電力変換器の部分放電検知技術

電動航空機に搭載されるインバーター・コンバーターといった電力変換器では、航空機搭載機器に求められる高い信頼性を確保することが課題になる。インバーター・モーターシステム同様、電力変換器内部でも、スイッチングで生じるサージ電圧によって部分放電が発生する懸念がある。そこで、部分放電が発生させない絶縁設計に加えて、新たな部分放電検知機能を開発した。部分放電検知部とスイッチング回路の制御部とを連動させることによって、運転中に部分放電を検知した場合には、即座に部分放電発生アラートを制御部に出力し、電源電圧を下げる、遮断するといった制御を行い、運転中の機器故障を未然に防ぐものである。

部分放電の検知には、部分放電信号とノイズを適切に切り分けることが重要である。交流電圧によって発生する部分放電に対しては、電流トランス(CT)とハイパスフィルター(HPF)で取得した信号に対して、いわゆる位相パターンを用いて部分放電信号を識別する手法がある。一方、スイッチング電圧波形は交流と異なって一定した位相が存在せず、また、スイッチング時に生じるサージ電圧が部分放電信号と同様のスパイク波形であり、両者を識別するのが困難であるといった課題もあり、従来手法が適用できなかった。そこで当社では、部分放電検知部に電源の制御信号を入力することでスイッチング回路の動作状態に応じた条件で部分放電判定を行うことができる新たな検知手法を開発した。この機能を実現するハードウェア構成を図8に示す。この機能は、航空機に搭載される電力機器の信頼性向上に寄与するものである。

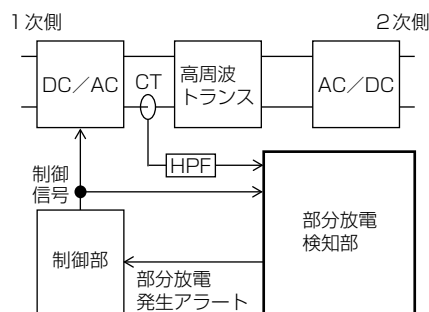


図8-電力変換器の部分放電検知機能ブロック図

3. む す び

SiCインバーター・モーター製品の絶縁信頼性確保に資する絶縁基盤技術について述べた。

今後も基盤技術の進化を通して、当社製品の信頼性向上に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状調査専門委員会：適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状，電気学会技術報告，No.1533（2022）
- (2) 峯岸太一，ほか：エポキシ樹脂における矩形波電圧が空間電荷蓄積に与える影響，令和8年電気学会全国大会，2-028，33（2026）