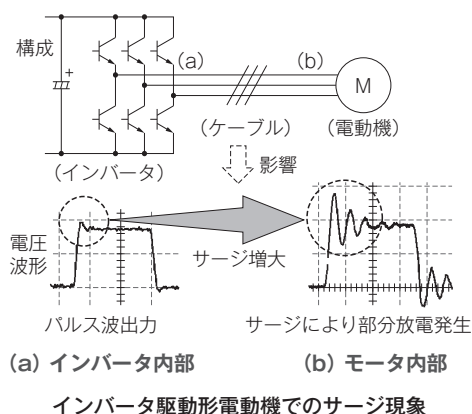


# インバータ駆動形電動機における インバータサージ評価技術開発

明石康行 Yasuyuki Akashi  
中村佑大 Yudai Nakamura  
関 篤志 Atsushi Seki

キーワード 絶縁技術, インバータ駆動, 解析技術, 放電検出

## 概要



近年のインバータの高電圧・高周波化に伴い、インバータ駆動形電動機巻線への電氣的負担の増大が課題とされている。この電動機巻線への電氣的負担を一次元回路網解析及び三次元解析によって評価した。また、実機でアンテナを用いた放電検出による健全性評価を行った。

一次元解析から、インバータの矩形パルス波が入力されると巻線に大きな電位が発生するという結果が得られた。同解析技術と放電検出によって固定子を評価したところ、巻線のターン間の電位差は放電開始電圧未満であると評価でき、実際に放電検出されないことを確認した。

## 1 まえがき

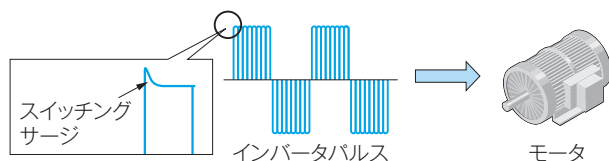
近年、インバータに使用される半導体素子性能や制御技術の向上とともに、インバータの高電圧・高周波数化が進んでいる。これに伴いインバータ駆動形電動機では、高電圧・高速回転化による高効率・大容量化が検討され、特に流体機械用途ではより高電圧・高速回転が求められている<sup>(1)(2)</sup>。

しかし、インバータのキャリアの高周波化と主回路デバイス的高速スイッチングが進むにつれ、「インバータサージ」と呼ばれる特有の現象が発生し、電動機巻線への電氣的負担の増大が知られるようになり、大きな課題として注目されている<sup>(3)</sup>。

本稿では、一次元回路網解析及び三次元電界解析で行った電動機巻線のサージ耐量の評価を紹介する。

## 2 インバータサージ

インバータ駆動形電動機は、インバータサージと呼ばれる現象が発生することが知られている。**第1図**にインバータサージの概要を示す。中央に示すパルス波を入力することで電動機を駆動するが、このパルス波には、インバータスイッチング素子動作に起因するサージが発生する。このサージが電動機に侵入する過程で増幅され、電動機端子部で



第1図 インバータサージ概要

インバータ駆動形電動機の絶縁課題であるインバータサージのイメージ図を示す。

過電圧が発生する現象がインバータサージと呼ばれている。

電動機巻線を構成するコイルでは、本来各ターン間に発生する電圧は一定である。しかし、サージが発生するとコイル内での電位分布が不均一となり、放電が発生するレベルの電位差がターン間に生じる可能性がある。この不均一な電位差による放電発生・劣化が、大きな課題となっている。

ここでサージによる各コイル及びターン間にかかる電圧を評価したいが、電動機では各相・各極の電位を測定することが限度であり、実際の電圧を測定することは非常に困難である。そこで、解析技術を用いた電圧評価を行うことが重要となる。

### 3 解析による巻線負荷推定

#### 3.1 一次元解析

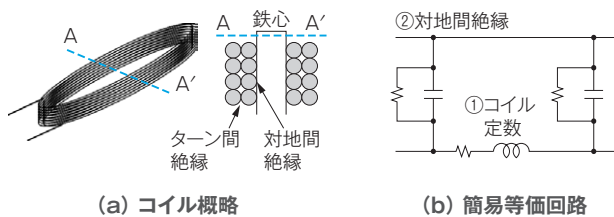
##### 3.1.1 回路網解析

一次元回路網解析ソフトLTspiceを用い、サージを模擬したインパルス波が巻線コイルに侵入した際のコイル電圧分担を解析した。

第2図にコイル1本あたりの概略と最も簡単な等価回路を示す。コイルは直列方向のインダクタンス成分及び抵抗成分と、コイル-鉄心間での静電容量成分及び抵抗成分から成る $\pi$ 型等価回路としてモデル化している。

##### 3.1.2 実験モデルでの回路網解析

第3図にモデルコイル電圧分担解析を示す。評価用に製作したモデルコイルを結線し、インパルス波を入力した場合の各コイル入力電位解析結果と実測結果である。ここで解析用の回路パラメータは、



第2図 コイル等価回路

一次元回路解析を行う (a) コイル概略と (b) 簡易等価回路を示す。

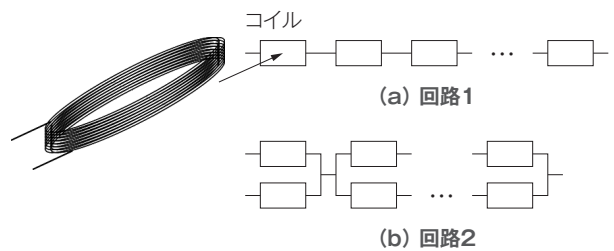
インピーダンスアナライザを用いて周波数特性を測定し、サージ波形に合わせ適切なものを選択している。また回路ソフト上、指数波形としてサージ波形を作成・入力することで解析している。

第3図 (a) は評価用モデルコイルを直列接続し、(b) は同数の同じコイルを直列・並列に組み合わせで接続した回路モデルの解析-実測を比較している。(a) と (b) のどちらも解析と実測で波形がおおむね一致した。

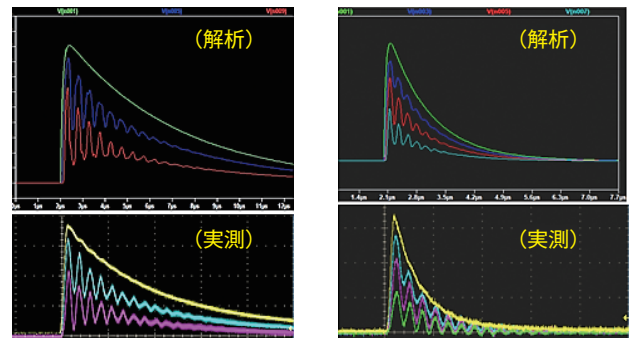
##### 3.1.3 電動機巻線モデル解析

第4図に当社製品の回路解析結果を示す。実際の電動機巻線に使用されるコイル及び結線をモデル化した回路に対し、パルス波を入力した場合の解析結果である。なお、第4図は三相結線モデルのうち一相を対象に、数点のコイル電位解析結果を表示している。

各コイルの入力電位は、入力パルスに対し増大する傾向があり、最大で任意コイルに入力パルスの1.6倍の電位が発生する結果となった。また各コイルの入力パルスには位相差があるため、位相差による電位差も考慮する必要がある。対象電動機は低電



##### ◆コイル入力電位を比較

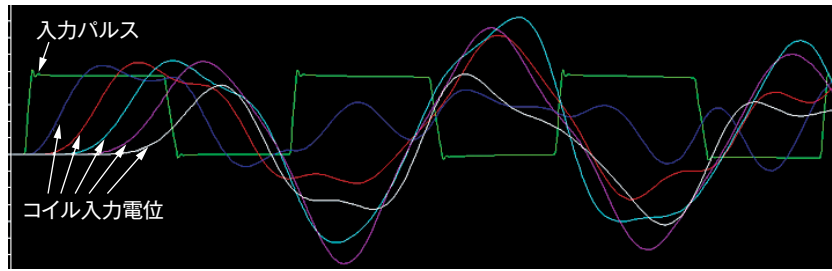
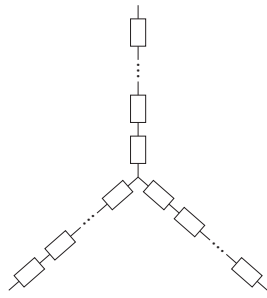


(a) 回路1 解析-実測比較

(b) 回路2 解析-実測比較

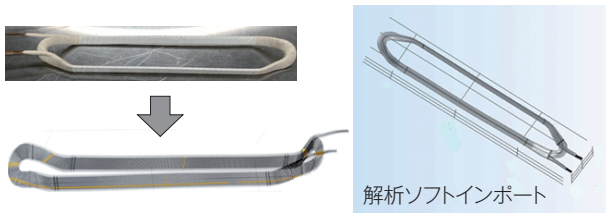
第3図 モデルコイル電圧分担解析

実験用コイルを用いた一次元回路解析結果と実測比較を示す。解析結果と実測がおおよそ一致している。



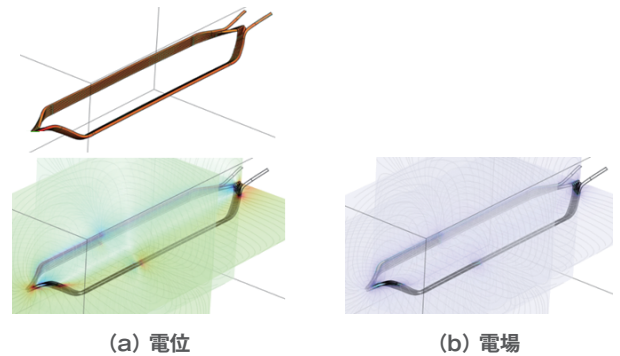
第 4 図 当社製品回路解析結果

当社製品を対象にパルス波を入力した場合の一次元回路解析結果を示す。入力パルスより大きな電圧がコイルで発生するという解析結果を得た。



第 5 図 解析用コイル三次元モデル

三次元解析を行うためのコイルモデルを示す。実コイルを 3D スキャンすることでモデル化した。



第 6 図 モデルコイル三次元電界解析

第 5 図のモデルを対象とした正弦波印加時の電界解析結果を示す。

圧階級機種で、入力パルスの 1.6 倍の電圧がコイルターン間にかかったとしても放電開始電圧には至らず、電動機巻線絶縁の健全性に問題はない。ただし、より大きなサージが重畳する場合には、その抑制が重要である。

### 3.2 三次元解析

連成解析ソフト COMSOL を用いて、実際のコイルを対象とした電界解析を行った。なお解析モデルは、コイルを 3D スキャンすることで作成している。

第 5 図に解析用コイル三次元モデルを示す。

第 6 図にモデルコイル三次元電界解析を示す。今回は、鉄心の無いモデルで解析した。解析結果から、コイルエンド部分で電界集中することが想定される。

本稿執筆時には、複雑なモデルに起因すると思われる解析エラーが発生して掲載できていないが、正弦波に続きインパルス波・パルス波での解析も実施しており、今後も引き続き検討する。

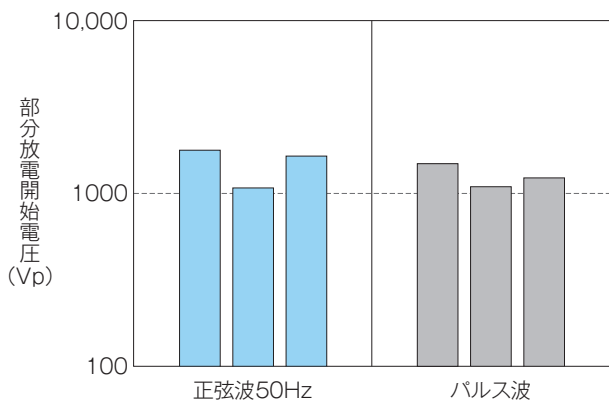
## 4 コイル放電計測

### 4.1 モデルコイル放電開始電圧

電動機巻線絶縁の健全性を評価するためには、各コイル分担電圧と併せ、実際の放電開始電圧を測定しておく必要がある。

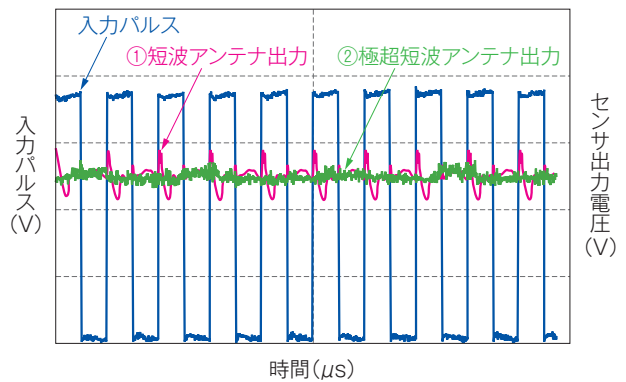
第 7 図にモデルコイルターン間部分放電開始電圧を示す。コイルターン間に商用周波数正弦波と高周波パルス波を入力した場合の放電開始電圧を比較する。ここで商用周波数正弦波では、部分放電が発生した際に流れるパルス電流を結合コンデンサと抵抗によって検出する検出インピーダンス法で放電計測する。本評価試験では放電電荷量 10pC を基準とし、計測装置の部分放電開始電圧測定機能によって判定する。

一方パルス波の場合、発生する部分放電周波数が高周波となるため、検出インピーダンス法による測定が難しい。そこで、部分放電に伴い発生する放射電磁波をアンテナによって検出する電磁波法で放電



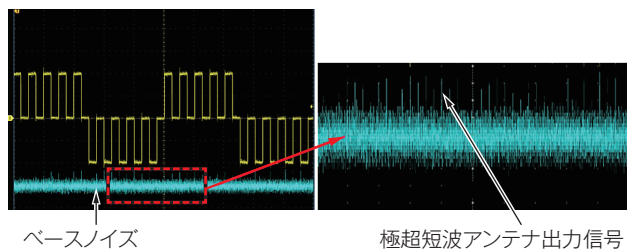
第7図 モデルコイルターン間部分放電開始電圧

モデルコイルターン間の部分放電開始電圧測定結果を示す。商用周波数正弦波最大値とパルス波で大きな差異がないことを確認した。



第9図 固定子放電検出

試作した電動機固定子を対象にパルス波入力時の放電検出を実施した。対象機では、駆動電圧・周波数入力時に放電は発生しなかった。



第8図 極超短波アンテナを用いた部分放電の検出状況

極超短波アンテナを用いた放電検出事例を示す。

検出した。本評価試験では、短波及び極超短波帯域に高い感度を持つアンテナを使用した。第8図に極超短波アンテナを用いた部分放電の検出状況を示す。極超短波アンテナの出力信号でベースノイズ信号と比較し、明らかに大きな信号出力が得られた時の電圧値を放電開始電圧としている。本試験では、正弦波最大値とパルス信号の放電開始電圧（ピーク値）はどちらも1000Vp以上で、ほとんど差はないものと評価できる。

## 4.2 固定子放電計測

評価用に製作した電動機固定子を対象に、駆動周波数10kHz、立ち上がり時間100nsオーダーのパルス信号を入力し、その際の放電計測を実施した。第9図に固定子放電検出を示す。放電計測は、放電放射電磁波計測(①短波アンテナ-3MHz~30MHz, ②極超短波アンテナ-300MHz~3GHz)及び過渡接地電圧計測(③TEV <Transient Earth Voltage>)

センサー-短波アンテナ同様の周波数帯域)の三つの方法で行った。この試作機は、4.1項で述べたモデルコイルで結線を構成している。なおTEVセンサは、対策をしていなかったためノイズの影響が大きく、第9図の結果は省略する。

第9図から、入力パルスの立ち上がり時に短波アンテナが反応していることが分かる。極超短波アンテナでは、第8図に示すベースノイズと明確に区別できるレベルの信号は得られていない。

ここで、本項で対象とする固定子は、3.1.3項と同様の回路解析を行った結果によると、コイル間には第8図の部分放電開始電圧を超える電圧は印加されないものと推定される。すなわち本評価結果として、短波アンテナ出力信号はノイズであり、駆動電圧・周波数印加時に放電発生せず、電動機巻線絶縁として健全性を保つものであると評価する。

## 5 むすび

一次元回路網解析及び三次元電界解析による電動機巻線への電氣的負担を評価した。またコイル・固定子に電圧印加した場合の放電計測を行った。

引き続き、より精度の高い電氣的負担推定とその対策検討を行っていく。

お客様へ高品質電動機絶縁を提供するため、今後も技術開発と電動機絶縁評価に尽力する所存である。

- ・LTspiceは、Analog Devices, Inc.の登録商標である。
- ・COMSOLは、COMSOL ABの登録商標である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

#### 《参考文献》

- (1) 野原学・大西貴之・大西保範・松本忠弘：「永久磁石同期電動機（PMモータ）の用途展開」, 明電時報367号, 2020/No.2, pp.48-51
- (2) 庄司豊・犀藤基・宮本恭昌・永田祥久：「インバータの用途展開」, 明電時報367号, 2020/No.2, pp.52-57
- (3) 大石和城・吉岡靖浩：「インバータ駆動電動機におけるサージ対策の基礎検討」, 明電時報328号, 2010/No.3, pp.51-56

#### 《執筆者紹介》



**明石 康行**  
Yasuyuki Akashi  
先進技術研究所  
回転機の絶縁技術開発に従事



**中村 佑大**  
Yudai Nakamura  
先進技術研究所  
回転機の電気設計及び絶縁技術開発に従事



**関 篤志**  
Atsushi Seki  
先進技術研究所  
回転機の電気設計及び絶縁技術開発に従事