

駆動システム効率向上のためのインバータ電圧波形の検討

近藤 稔* 宮部 実 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Analytical Study on Inverter Voltage Waveform to Improve Traction System Efficiency

Minoru Kondo*, Minoru Miyabe (Railway Technical Research institute)

Induction motors are widely used as traction motors of railway vehicles. Usually, they are driven by an inverter with one-pulse mode (rectangular wave) at medium and high speed range. However, the one-pulse waveform contains lower harmonics that induces additional losses in the motors. In this paper, we have studied the optimal waveform that can reduce the additional losses and proposed a two-pulse waveform using efficiency optimal control (EOC). We have conducted a finite element analysis to verify its effectiveness. The result show that the total loss of the motor decreases by 14% when using the propose waveform.

キーワード：インバータ電圧波形，特定高調波消去，効率最適制御

(Inverter voltage waveform, selected harmonic elimination, efficiency optimal control)

1. はじめに

インバータ電車では中高速域において1パルスのインバータ電圧波形を用いて電動機を駆動するが，1パルスの波形には高調波成分が多く含まれており，それによる損失が電動機内で発生する。

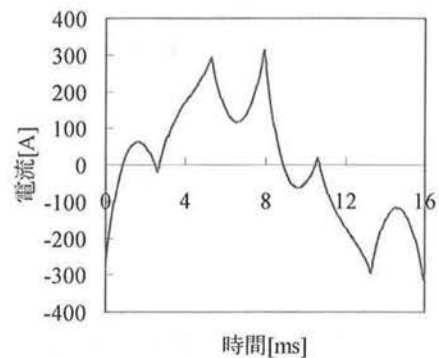
そこで，2パルスまたは3パルスで低次高調波を低減した波形を用いることで電動機内部の発生損失を低減し，高効率化できる可能性がある。

本論文では損失低減の観点から最適なインバータ波形について検討する。

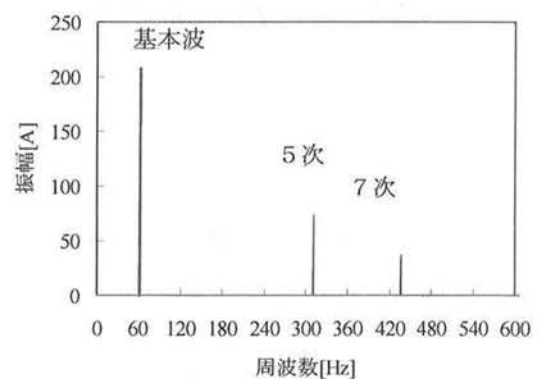
2. 低次高調波低減波形の検討

〈2・1〉 特定高調波消去法による波形 電車用の駆動用インバータには電圧形インバータが用いられているが，最大電圧を使用する中高速域では，1パルス（矩形波通電）の電圧波形を用いるのが一般的である。1パルス波形ではインバータの出力電圧波形に多くの低次高調波成分が含まれており（図1），この高調波成分により誘導電動機では多くの損失が発生する。そこで，電圧波形を変更して高調波成分を低減することで誘導電動機内の損失を低減できる可能性がある。

1パルス波形はインバータのスイッチング回数を最小限にできるため，スイッチング損失を小さく出来る利点がある。しかし，最近では半導体デバイス技術の進歩等によりスイッチング損失を低減する技術が発展しており⁽¹⁾⁽²⁾，今後はスイッチング回数を増やす余地も出てくるものと考えられる。



(a) 1パルス時の電流波形



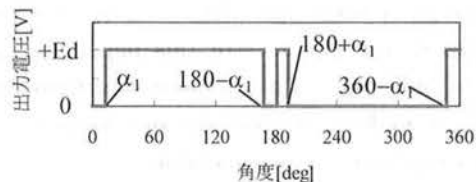
(b) 周波数分析

図1 1パルス時の電流波形と周波数分析結果

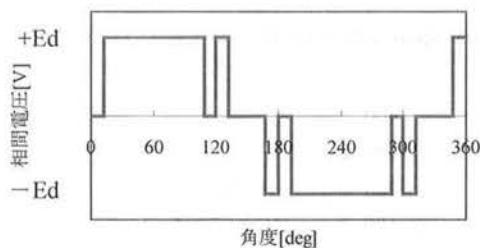
スイッチング回数を増やす余地がある場合に低次高調波を低減する方法として，特定高調波消去(SHE：Selected

Harmonic Elimination)がある。SHE をはじめに提案したのは Turnbull⁽³⁾であり、5 次と 7 次を消去する波形等が提案された。その後 Patel⁽⁴⁾らにより一般化された SHE の理論が示され、広く用いられている。

著者らはこの SHE の理論を用いて、5 次高調波を消去した 2 パルス波形 (図 2) と、5 次と 7 次の高調波を消去した 3 パルス波形 (図 3) を求め、これによる損失低減効果を電磁界解析により評価した。その結果、これらの波形の適用により電動機効率が 1%以上向上する可能性が示された⁽⁵⁾。

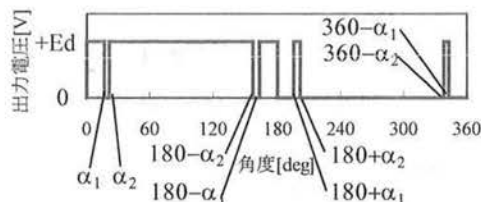


(a) 出力電圧波形

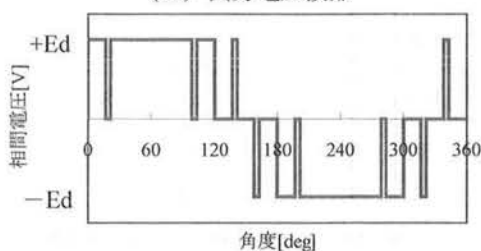


(b) 相間電圧波形 (U-V間)

図 2 2 パルス (5 次高調波消去)



(a) 出力電圧波形



(b) 相間電圧波形 (U-V間)

図 3 3 パルス (5 次, 7 次高調波消去)

〈2・2〉 最適波形の検討 SHE を用いた波形により低次高調波が消去でき、損失低減が可能となる。その一方で、SHE では特定の高調波を完全に消去できる反面、それ以外の高調波は増加することがあるため、低次高調波のみを完全に消去した波形が損失低減の観点から最適であるとはいえない。そこで、効率の観点から最適な波形の研究が Zach⁽⁶⁾らにより行われた。Zach らの研究では、基本波の変調率を

選択可能にするために、パルス数が 3 以上の波形を前提にして、基本波の変調率がある値に固定された場合の最適波形導出法について研究している。そのため、次式で表される正規化された高調波損失 P_H を最適化の目的関数とし、これを最小化することを目指している。

$$P_H = \sum_{k=5,7,\dots} \frac{u_k^2}{1+(kW)^2} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、

$$u_k = \frac{1}{k} (1 - 2\cos k\alpha_1 + 2\cos k\alpha_2 - \dots \pm 2\cos k\alpha_M) \quad \dots\dots (2)$$

$$W = \frac{\omega_1 L}{R} \quad \dots\dots (3)$$

なお、上式は単純な L-R 回路を前提としたものであるが、基本波成分の力率を元に導出された電動機に対応する等価な L-R 回路モデルを用いた場合と、電動機の詳細な等価回路モデルを用いた計算結果とで計算結果に大きな差が無いことが Zach らにより示されており、以下では L-R 回路を用いて最適波形を検討する。

Zach の方法がある指定した値の基本波成分を含む最適波形を導出しているのに対し、本研究では、1 パルス波形の代替波形の検討を主目的としているため、基本波の変調率を指定された値に固定する必要は無い。

一方、1 パルス波形は基本波成分を最大化する波形であるため、その代替波形の基本波成分も可能な限り大きくすることが求められる。そこで、次式のように、正規化された高調波損失を正規化された基本波電力 (電動機出力に相当) で除した損失の比率 r_H を最適化の目的関数とし、これを最小化する波形を求めることとする。

$$r_H = \left(\sum_{k=5,7,\dots} \frac{u_k^2}{1+(kW)^2} \right) / \left(\frac{u_1^2}{1+W^2} \right) \quad \dots\dots (4)$$

これにより、損失が同じであれば基本波成分が大きい波形の方が最適波形として選択されることになる。

3 パルス波形を前提に、スイッチ角 (α_1, α_2) に対する r_H の値をプロットした等値線図を図 4 に示す。

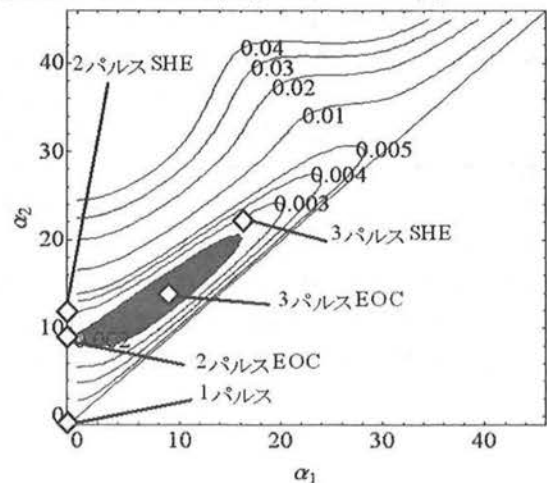


図 4 スイッチ角と損失の比率 r_H の関係

W の値は本誘導電動機の定格点における力率(79%)に対応する値を次式により算出して用いている。

$$W = \tan(\arccos(pf)) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 pf は力率である。

図 4 中の灰色に塗りつぶした領域が最も損失が小さい領域となるが、この領域は $\alpha_1=0$ 付近まで延びている。 $\alpha_1=0$ は 2 パルス波形を意味しているため、2 パルスでも損失を 3 パルスでの最小値並みに小さくできる波形が存在することが分かる。1 パルスに対するスイッチング回数を考えると、2 パルスは 3 倍、3 パルスは 5 倍となるが、インバータの冷却等を考えるとスイッチング回数は極力減らしたい。そのため、損失低減効果が同程度であるのならば 2 パルス波形が望ましい。そのため、1 パルス波形の代替波形としては、まず、図 4 中に示した、 $\alpha_1=0^\circ$ 、 $\alpha_2=9^\circ$ の点に対応する 2 パルス波形を最適波形の候補の一つとする。以下ではこの波形のことを 2 パルス EOC (Efficiency optimal control) と呼ぶ。

また、損失を最小化する観点からは図 4 中で損失が最小になる点 ($\alpha_1=9^\circ$ 、 $\alpha_2=14^\circ$) に対応する波形を選択するのが良く、その波形を最適波形のもう一つの候補とする。以下では、この波形を 3 パルス EOC と呼ぶ。

次章では、2 パルス EOC と 3 パルス EOC の波形による損失低減効果を電磁界解析により検証する。

3. 電磁界解析による最適波形の検証

〈3・1〉 解析方法 最適波形による損失低減効果を検証するために、標準的な通勤電車の誘導電動機を対象として電磁界解析を行い、損失低減効果を評価する。なお、対象とする誘導電動機と解析方法は以前著者らが SHE による損失低減効果を検証した際のもの^⑤と同一とする。具体的には表 1 に示すような仕様の誘導電動機を対象とする。

電車の誘導電動機は、高電圧と振動に耐える必要性から固定子スロット形状は開放スロットが一般的に用いられ、解析対象とした誘導電動機でもこの開放スロットを用いている。また、高効率化を目指した研究であるため、解析対象とした誘導電動機では、標準的な通勤電車の誘導電動機に用いられる材料よりも低損失な材料を用いている。

表 1 誘導電動機の要目

相数/極数		3 / 4
定格出力 (1 時間定格)		190kW・1825/min・1100V
絶縁種別		H 種
鉄心	鉄心長	180mm
	スロット数	固定子: 36 回転子: 46
	材質	35A300
固定子巻線	導体数/スロット	12
回転子導体	材質	銀入り銅 (抵抗率: $0.262 [\mu \Omega \text{m}]$, 150°C)

評価対象とする電圧波形は、以前の検討^⑤で既に電磁界解析を行った 1 パルス、2 パルス SHE (5 次高調波消去)、3 パルス SHE (5 次・7 次高調波消去) に、今回の最適波形候補である 2 パルス EOC と 3 パルス EOC を加えた 5 種類とし、新たに追加した 2 種類の EOC について電磁界解析を行う。いずれの場合においてもインバータ電源の直流電圧は 1500V として電圧波形を生成する。評価点は表 1 に示した定格点とするが、すべり一定値に固定して解析を行うため、波形により出力が若干変化する。そのため、最終的に得られる損失の計算結果は入力電力で除して、入力電力に対する損失の割合を示す値で評価することとする。

電磁界解析は、電磁界解析ソフト JMAG-Studio9.0 を使用し、二次元過渡応答解析を行った。計算モデルは、計算負荷の軽減を図るため誘導電動機の構造の対称性を考慮し、1/2 モデルとした。図 5 にメッシュ分割した計算モデルの概略図を示す。

メッシュの作成にあたって、磁束密度変化の激しいギャップ近傍の回転子導体表層部において、特にメッシュの細分化を図ることとした。その結果、回転子導体断面 (7.8mm × 25mm) に対してメッシュサイズは、ギャップ近傍の回転子導体表面で 0.5mm、回転子導体表面から 3mm までの領域は 0.8~1.0mm とし、それ以外の領域 (固定子コイル・固定子鉄心・回転子鉄心など) は 2.0~10mm とした。また、時間刻みは、1 電気周期を 360 分割したものを 1 ステップとした。回転子のエンドリング部の抵抗の効果については回転子導体の抵抗率を高くすることで考慮している。

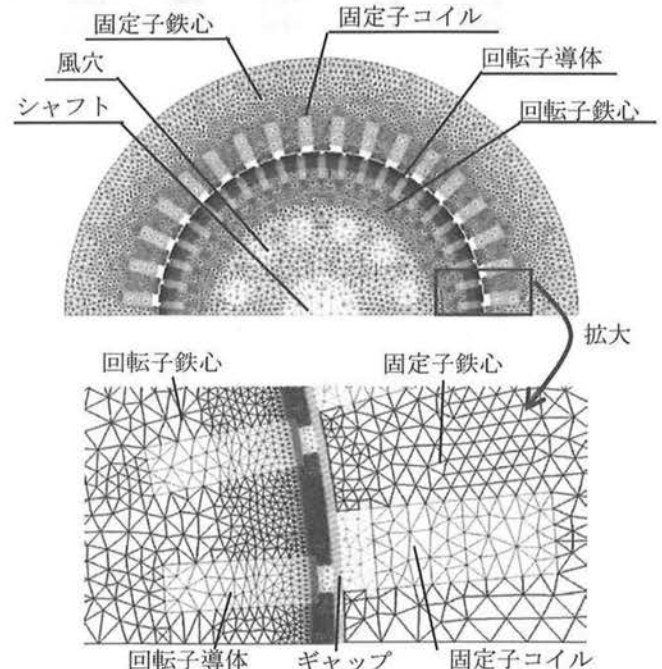


図 5 計算モデルの概略図 (1/2 モデル)

計算結果を用いて損失分析を行う際には、回転子銅損について要素毎に周波数解析を行い、基本波成分、SHE で消去される次数に対応する 6 次の高調波成分、その他の高調

波成分に分離する。固定子銅損は解析結果から得られる電流波形を周波数分析し、基本波成分と高調波成分に分離する。鉄損については磁束密度の計算結果を用いて鉄心材料の特性から計算する。機械損については解析結果と無関係に設計値を与えることとする。

〈3・2〉 解析結果および考察 解析結果を用いて主電動機損失を分析した結果を図6に、高調波損失(回転子銅損と固定子銅損に含まれる高調波損失の合計)と出力の計算結果を図7示す。

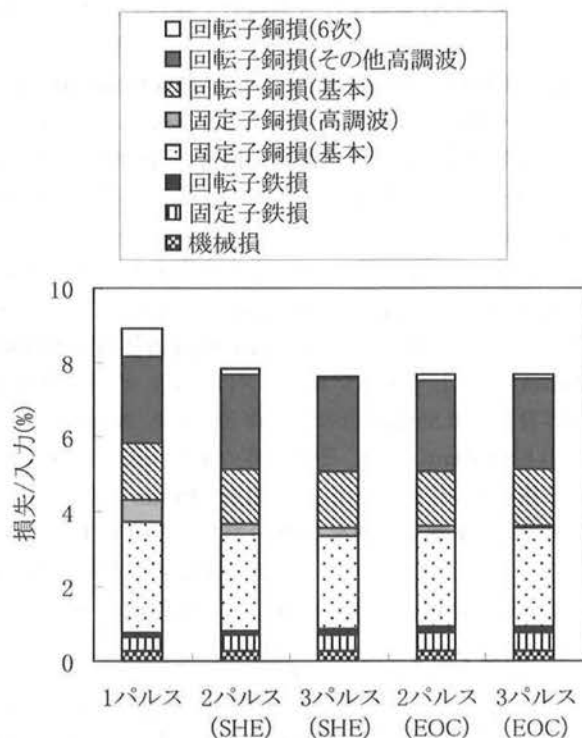


図6 発生損失の計算結果

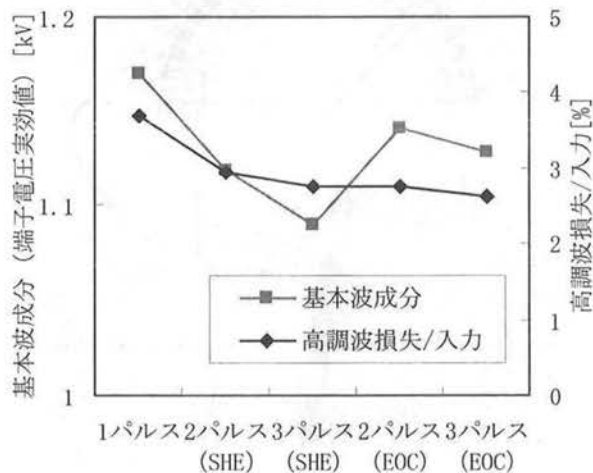


図7 高調波損失および出力の計算結果

図6によると、1パルスでは9%程度であった損失が、2パルスや3パルスでは8%以下に減少しており、インバータの電圧波形を変えることで高効率化が達成されていること

が確認できる。損失低減効果は主に回転子銅損の6次の成分の低減により得られているため、トータルの損失低減効果はSHEとEOCとではほぼ同じである。ただし、EOCでは固定子銅損の高調波成分がSHEよりも更に低減されていることが確認できる。また、高調波損失の合計は図7で確認できるようにSHEよりもEOCの方が若干小さくなっている。さらに、図7によると基本波成分はSHEよりもEOCの方が大きい。すなわち、なるべく大きな基本波成分を含ませながら高調波成分を低減するという、式(4)で意図した目的が達成されていることが確認できる。なお、3パルスEOCと2パルスEOCとでは損失削減効果も基本波成分も同等であり、大きな差は見られなかった。

4. おわりに

電車の駆動システムにおいて用いられているインバータ駆動誘導電動機の効率向上を目指し、現在用いられている1パルスの波形の代替となるインバータ電圧波形の検討を行った。

まず、3パルス以下のパルス数の波形に対し、誘導電動機に対応するL・R回路を用いて最適波形の検討を行った。その検討では、高調波損失を出力で除したものに相当する関数を評価関数として用いることを新たに提案し、その評価関数の値を最小化する波形を導出した。

次に、その波形で誘導電動機を駆動した場合の損失低減効果を電磁界解析により評価した。その結果、導出した最適波形の波形を用いることで、単純に低次高調波を消去した場合に比べて更なる高調波損失低減と基本波成分の増大が達成できることが確認できた。

今後、更に検討・検証を進め、電車の駆動システムの高効率化を実現していきたい。

文 献

- (1) 石川勝美, 小川和俊, 長洲正浩, 亀代典史, 小野瀬秀勝: "SiC ダイオードを搭載した鉄道インバータ", 第46回鉄道サイバネシンポジウム, 論文番号506, 2009
- (2) 小林宣之, 菊地寿江, 松本康, 井上亮二, 古谷勇真, 山下陽太, 寺内伸雄, 近藤圭一郎: "IGBT 直列インバータを用いた鉄道車両駆動用誘導機速度センサレスベクトル制御の現車試験結果", 電気学会交通電気鉄道研究会資料, TER-07-28, pp.29-33, 2007
- (3) F. G. Turnbull: "Selected Harmonic Reduction in Static DC-AC Inverters", IEEE Trans. Commun. Electron., Vol.83, pp.374-378, 1964
- (4) Hasmukh S. Patel, Richard G. Hoft: "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I - Harmonic Elimination", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-9, No.3, 1973
- (5) 宮部実, 近藤稔: "低次高調波消去インバータ波形による電車用誘導電動機の損失低減", 電気学会回転機・半導体電力変換・モータドライブ合同研究会資料, RM-10-064, SPC-10-077, MD-10-009, pp.45-50, 2010
- (6) Franz C. Zach, Hans Ertl: "Efficiency Optimal Control for AC Drives with PWM Inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No.4, 1985