

電磁結合の活用によるチョッパ用リアクトルの 小型軽量化

仲村 孝行* 田口 義晃* 小笠 正道*

Reduction of Reactor Weight by Using Electromagnetic Coupling

Takayuki NAKAMURA Yoshiaki TAGUCHI Masamichi OGASA

We studied on reduction of reactor weight and current ripple by using electromagnetic coupling of reactor. The study has shown that a selected optimal coefficient of electromagnetic coupling reduces both each phase current ripple and total phase combined current ripple. We verified the result by the experiment with newly manufactured reactors which implement an optimal electromagnetic coefficient. The weight of manufactured reactor is lighter by 44% than that of conventional three phase reactors.

キーワード：チョッパ，リアクトル，電流リップル振幅，チョッパ通流率，電磁結合係数

1. はじめに

蓄電媒体技術の発展に伴い、近年蓄電媒体を搭載した鉄道車両が実用化されつつある。蓄電媒体を車載するためには直流-直流変換機器を併せて車載する必要がある。例えば鉄道総研が保有する架線集電と車載蓄電のハイブリッド試験電車（LH02形）には、3相3重電流可逆チョッパが2基搭載されている¹⁾。しかし、従来の車両にはなかった変換装置の搭載により、車両の質量が大きくなるといった課題が生じた。鉄道車両用の直流-直流変換機器は高調波（電流リップル）の低減をしつつ、装置の小型軽量化が求められる。高調波の低減方法としては、一般的には多相多重化し、等位相差スイッチングを行うことで合成分の電流リップル振幅の低減を実現できることが知られている²⁾。また、多相多重化することにより、1相あたりの直流電流を低減することができるため、発熱を低減できる利点がある。しかし、多相多重化した場合、アーム数が増えるので半導体数が増大する欠点がある。また、電流の平滑に不可欠な平滑リアクトルについても個数が増加し、かつ、所望のインダクタンスを得るため相互の電磁干渉が起らないように配置するため大型化、重量化する。したがって電流リップル振幅を低減しつつ、リアクトルの小型軽量化を実現することが望まれる。

インダクタンスを確保するためには鉄心リアクトルを用いればよいことが知られている。しかし、鉄道用に用いる場合には事故電流への対策の観点から、大電流にお

いても高いインダクタンス値を確保しなくてはならない。そのため鉄道用には標準的に空心リアクトルが用いられており、空心リアクトルを前提として電流リップルを低減しつつ小型軽量化する必要がある。

空心リアクトルでインダクタンスを確保しつつ小型軽量化する方法の一つとして電磁結合を活用することが挙げられる。電磁結合を活用し、電流リップルによる発熱を低減すれば、冷却システムを簡略化でき、システムとして小型軽量化が図れる。これを実現するためには電流リップル振幅と電磁結合係数の関係の把握が不可欠である。

そこで著者らは等位相差スイッチングした場合の多相多重電流可逆チョッパにおける電流リップル振幅をチョッパ通流率とリアクトル間の電磁結合係数の関数として導出した。その結果、チョッパ通流率に応じた適切な電磁結合係数を選択することにより、相電流リップル振幅と合成電流リップル振幅を同時に低減できることが判明した³⁾。また、任意の電磁結合係数を実現するリアクトル巻線構造を考案した。考案した構造について電磁界解析を行った結果、所望の電磁結合係数が得られることを確認した⁴⁾。以上の導出結果を元に、実機レベルの電気鉄道車両を適用対象としたリアクトルを製作した。製作したリアクトルは従来車載していたリアクトル群と比較して約44%軽量化することができ、必要な電磁結合係数が得られた。このリアクトルを実機レベルの電気鉄道車両用チョッパ装置に用いた結果、相電流リップル振幅の増加分を10%程度に抑えつつ、合成電流リップル振幅を33%に低減することができた。

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

特集：車両技術

2. 相電流リプル振幅と合成電流リプル振幅を同時に低減する電磁結合係数

2.1 電流リプル振幅・対単相比の理論値の導出

本課題で扱うリアクトルは、図1に示すような多相多重電流可逆チョップ内にあるものである。各レグにおける上下アームは相補動作を行うものとするため、電流は連続であるものとして扱える。各相には自己インダクタンス L のリアクトルがあるものとし、相間の相互インダクタンスを M とする。電流可逆チョップであるため、昇圧チョップとして作動させるためには降圧チョップの出力電流の直流成分を負の値として考えれば昇圧チョップと降圧チョップを一括で論ずることが可能となる。そのため以下で求める電流リプル振幅(図2)は降圧チョップについて考える。多相多重チョップについては、電流リプル振幅は各相のリアクトル自体に発生する電流リプル振幅と、合成した電流リプル振幅は異なり、前者を相電流リプル振幅、後者を合成電流リプル振幅と定義する。等位相差スイッチングを行った場合、合成電流リプル振幅は低減されることが知られているが、リアクトルの発熱の観点からは相電流リプル振幅も低減しなくてはならない。

そのため、相電流リプル振幅と合成電流リプル振幅の両者を導出した。しかし、単に電流リプルを求めるだけでなく、電磁結合の効果を評価するための指標が必要である。そこで、得られた電流リプル振幅を同一入力電圧、同一周波数、同一通流率における単相時の値で除した単相に対する比、対単相比を導入する。対単相比が1未満であれば電磁結合による効果があることを意味する。

なお、単相降圧チョップの電流リプル振幅 i_{rip} は(1)式で示される。ここで E_1 は入力電圧であり、 α はチョップ通流率、 f はチョップ周波数であり $f = 700\text{Hz}$ とする。チョップ通流率 α はチョップ1周期における on 時間の割合である。電流が連続であるとする、チョップ通流率は入力電圧 E_1 に対する出力電圧 E_2 の割合に等しく、 $\alpha = E_2/E_1$ でもある(図1, 図2参照)。

$$i_{rip} = \frac{E_1}{2fL} \alpha(1-\alpha) \quad (1)$$

2相2重降圧チョップで等位相差スイッチングした場合の相電流リプル振幅 i_{ph_rip} は(2)式で、合成電流リプル振幅 i_{sum_rip} は(3)式で与えられる³⁾。ここで、 k は電磁結合係数(=相互インダクタンス M を自己インダクタンス L で除した値)であり、正の場合は和動結合を、負の場合は差動結合を意味する。なお、等位相差スイッチングした場合は通流率が0.5を境に各値は異なる。以下では通流率 α が $\alpha \leq 0.5$ について論じる。 $\alpha \geq 0.5$ の場合は各式の α に $1-\alpha$ を代入すればよい。

$$i_{ph_rip} = \frac{E_1}{2fL} \frac{\alpha}{1+k} \left(\frac{1}{1-k} - \alpha \right) \quad (2)$$

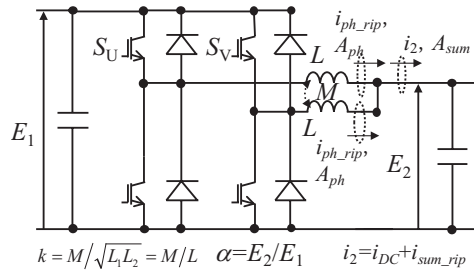


図1 多相降圧チョップ (2相)

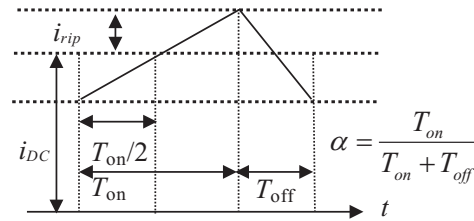


図2 電流リプル振幅 i_{rip}

$$i_{sum_rip} = \frac{E_1}{2fL} \frac{\alpha(1-2\alpha)}{1+k} \quad (3)$$

得られた各式を(1)式で除することにより相電流リプル振幅の対単相比 A_{ph} 、合成電流リプル振幅の対単相比 A_{sum} はそれぞれ以下の通りとなる。

$$A_{ph} = \frac{1}{(1+k)(1-\alpha)} \left(\frac{1}{1-k} - \alpha \right) \quad (4)$$

$$A_{sum} = \frac{1}{1+k} \cdot \frac{1-2\alpha}{1-\alpha} \quad (5)$$

相電流リプル振幅の対単相比 A_{ph} のグラフを図3に、合成電流リプル振幅の対単相比 A_{sum} のグラフを図4に示す。相電流リプル振幅の対単相比 A_{ph} は図3に示すように極小値が存在する。極小値を与える電磁結合係数 k_{min} はチョップ通流率 α の関数として(6)式で与えられ、そのときの最小値 A_{ph_min} は(7)式となる³⁾。

$$k_{min} = 1 + \frac{\sqrt{1-2\alpha} - 1}{\alpha} \quad (6)$$

$$A_{ph_min} = \frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{\alpha}{1-\sqrt{1-2\alpha}} \right)^2 \quad (7)$$

以上より、 k_{min} および A_{ph_min} は α の関数となる。

一方、合成電流リプル振幅の対単相比 A_{sum} は電磁結合係数 k の増加に対して単調減少である。相電流リプル振幅と合成電流リプル振幅の両方で対単相比が1未満となるように、通流率に応じた電磁結合係数を選択する必要がある。また、電磁結合の効果があるといえる $A_{ph} < 1$ となる電磁結合係数の範囲も通流率によって異なる。(4)式における $A_{ph} = 1$ を満たす解 k は2個存在する。1つの解は $k = 0$ のときであり、もう1つの解 k_0 ($\neq 0$) は $-1 < k_0 < 0$ に存在し、以下の値となる。

$$k_0 = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (8)$$

また、合成電流リプル振幅の対単相比 $A_{sum} = 1$ となる電

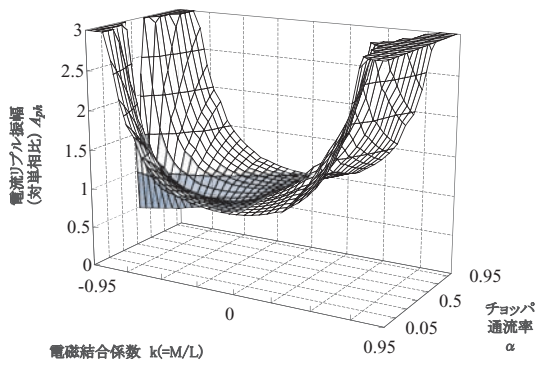


図3 相電流リップル振幅の対単相比 A_{ph} (2相チョップ)

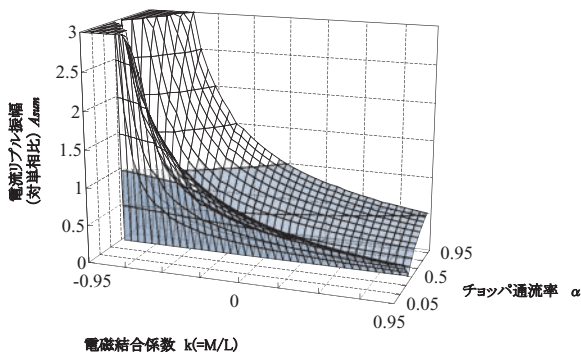


図4 合成電流リップル振幅の対単相比 A_{sum} (2相チョップ)

磁結合係数 k は $k=k_0$ となり、相電流リップル振幅の対単相比 A_{ph} が 1 となる k と同値となる⁴⁾。したがって、 $k_0 < k < 0$ となる電磁結合係数 (差動結合) にすれば相電流リップル振幅についても合成電流リップル振幅についても対単相比が 1 未満となる。その範囲を図5に示す。図5の塗りつぶしていない部分は電磁結合が電流リップル低減に対して有効となる範囲である。また、点線が相電流の対単相比を最小とする電磁結合係数 k_{min} の軌跡である。

2.2 適用対象に応じた電磁結合係数の選択

前項では電流リップル振幅の低減指標である対単相比を低減する電磁結合係数について解析した。その結果、相電流の対単相比 A_{ph} を最小とする電磁結合係数の解析解が存在することが判明した。また、相電流についても合成電流についても同時に対単相比が 1 未満となる電磁結合係数の範囲を明らかにした。どちらもチョップ通過率の関数であり、適用対象に応じて最適な電磁結合係数を用いなくてはならない。逆に適用対象のチョップ通過率が判明していれば、その通過率から得られる相電流の対単相比 A_{ph} を 1 未満とする電磁結合係数を使用したリアクトルを用いることで電流リップル振幅の低減を実現することが可能となる。

ここで、具体的な適用例として蓄電型電気車について考察する。蓄電型電気車には充放電用チョップが必要である。充放電用チョップに適用した場合の最適電磁結合

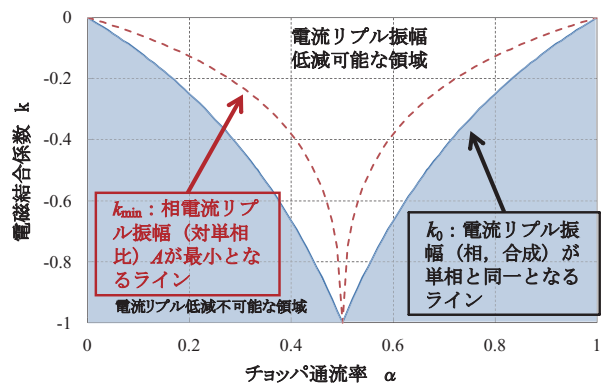


図5 電流リップル振幅を低減可能な領域

係数を考察する。例えば、実際の蓄電搭載型ハイブリッド電車では、チョップ装置を用いて直流 1500V/600V ⇔ 直流 750V へ変換する¹⁾。そこで、直流 1500V 架線から直流 750V に変換する場合に適する電磁結合係数を検討する。架線電圧は 1200V ~ 1800V で変動するため、使用するチョップ通過率 α の範囲は $0.42 \leq \alpha \leq 0.62$ となる。したがって、この α の範囲で $k_0 < k < 0$ となるような電磁結合係数を選択すればよい。電磁結合係数の範囲は図5より $-0.61 < k < 0$ となる。この範囲で k_{min} に近い電磁結合係数を使用すると相電流リップル振幅をより低減できる。図5より、使用する通過率では -0.5 付近となれば、 k_{min} に近くなり電流リップル振幅を低減できると考えられる。仮に、チョップ通過率 $\alpha = 0.45$ のとき k_0 の値は $k_0 = -0.81$ となる。この通過率における最小値 k_{min} とそのときの相電流リップル振幅の対単相比 A_{ph} は $k_{min} = -0.52$ で $A_{ph} = 0.79$ となる。直流 1500V 系で使用する場合は電磁結合係数を $-0.5 \sim -0.4$ とすると $A_{ph} = 0.80$ 付近まで低減できる。

3. 任意の電磁結合係数を実現するリアクトル構造と製作

3.1 現状のリアクトル群

鉄道総研が保有する架線・バッテリーハイブリッド試験電車に使用されているリアクトルを図6に示す。3相分を相互の電磁結合ができるだけ少ないように設置している。そのため電磁結合係数 k は 0 として扱う。1台あたりの質量は 90 kg、自己インダクタンス L は 4.3 mH である。3台のリアクトルを同相スイッチングして使用している。定格負荷電流 (合成) は $i_{DC} = 360$ A である。

3相同相スイッチング時の相電流リップル振幅 i_{ph_rip} は単相と同じ(1)式で、合成電流リップル振幅 i_{sum_rip} は単相の3倍である(9)式となる。

$$i_{sum_rip} = \frac{3E_1}{2fL} \alpha (1 - \alpha) \quad (9)$$

特集：車両技術



図6 車載リアクトル群

3.2 2相一体化リアクトルの構造

2章では適切な電磁結合係数を選択することで2相2重電流可逆チョップの電流リップル振幅の低減が可能であることを理論的に示した。そこで、2章で示した方法で電流リップル振幅の低減を実現するために、実機レベルの電気鉄道用チョップ用とした適切な電磁結合係数を実現する空心リアクトルを製作することとした。そのため、2章に示した電磁結合係数を得られるように著者らは2相を一体化し、2相を交互巻する部分を設ける方法を考案した。具体的な形状を図7に示す。単相分のx巻分は従来と同じ巻き方（単独巻）をして、残りy巻分をU相V相交互に巻く方法（交互巻）を採った。x巻とy巻の割合を変えることで任意の電磁結合係数を実現できる。また、電磁結合係数の正負は結線によって変更でき、正の場合は和動結合、負の場合は差動結合とすればよい。1相あたりの巻数を216、2相分の全長を一定としてx:yの割合を変えた場合のインダクタンスおよび電磁結合係数を確認すべく電磁界解析を実施した。結果を図8に示す。y=0の場合は通常のリアクトルと同様に交互巻の部分が存在しない巻き方である（図7（a））。この場合は2相分別個のリアクトルを一体化させることで電磁結合係数0.14を得た。一方x=0の場合は単独巻の部分が存在しない巻き方である（図7（c））。図8より自己インダクタンスは1.85mHであり、単独巻のみと比べて約57%に低下した。この原因として、リアクトルの巻線ピッチが長くなり、リアクトル単体の磁路長が長くなることによりインダクタンスが低下していることが挙げられる。相互インダクタンスは、自己インダクタンスとほぼ同じ値になり、電磁結合係数0.99を実現できた。

x=y=108の場合は半分が単独巻でもう半分が交互巻のモデルである（図7（b））。このときの自己インダクタンスは2.50mHであった。x=0の場合と同様に1相あたりの巻線のピッチが長くなり、単体で見ると磁路長が長くなったことがインダクタンスが低下した原因と考えられる。相互インダクタンスは、自己インダクタンスの半分程度となり、部分的な電磁結合により、電磁結合係数0.47を実現できた。

以上からxとyを変化させることにより、kは0.14～0.99の範囲で任意の電磁結合係数が得られることが判明した。蓄電型電気車の充放電チョップに適用する際は電磁結合係数を約0.5として差動結合（k=-0.5）とすれば、電流リップル振幅は低減可能となることを2章で示した。

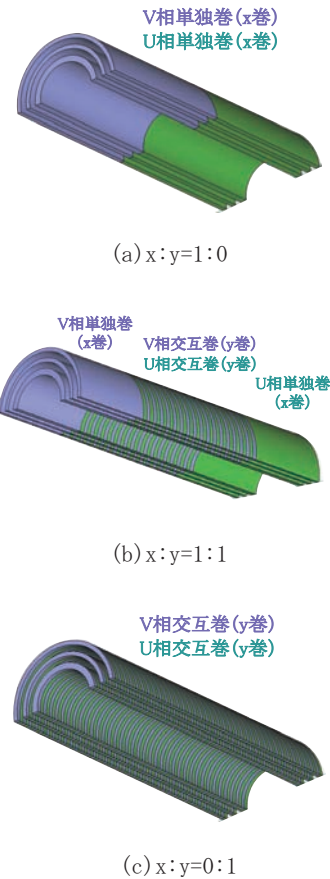


図7 一体型リアクトル

つまりx:y=1:1としたリアクトルを製作すれば、電流リップル振幅の低減が可能となる。

3.3 電磁結合係数が0.5付近となるリアクトルの製作

前項の電磁界解析結果より、図7を基本とし、x:y=1:1とすれば電磁結合係数0.5付近を実現できることが考えられる。電気鉄道用チョップ装置を適用先とした電磁結合係数0.5付近の実現性を確認すべくx:y=1:1としたリアクトルを製作した。

製作したリアクトルを図9に示す。製作したリアクトルのインダクタンスをLCRメータにて測定した結果、自己インダクタンスLは3.38mH、電磁結合係数は0.6で

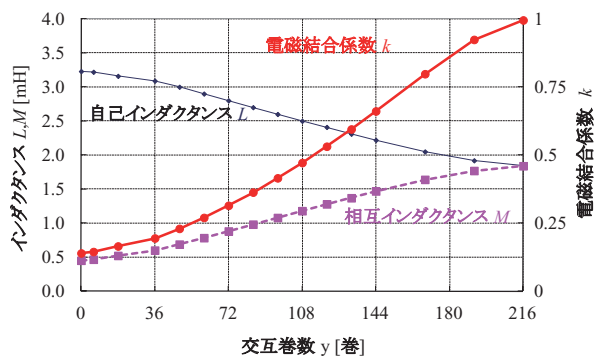


図8 交互巻数に対する電磁結合係数

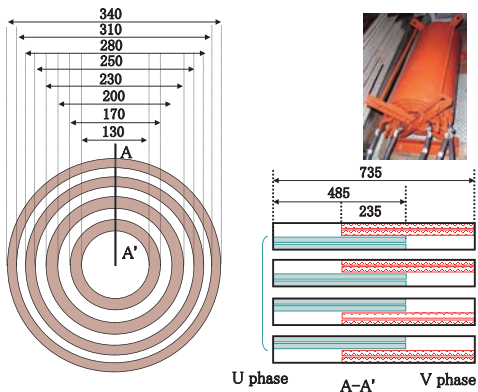


図9 製作したリアクトル

あった。得られた値を以後の計算で使用する。質量は2相合計で150kgであり、従来の2相合計で180kgに比べると17%，3相分で比較すると44%質量が低減した。

4. 通電試験結果

4.1 現状リアクトルの電流リプル振幅

現状の3相同相スイッチングにおける電流リプル振幅の試験結果を図10に示す。出力電流 i_2 の直流成分 i_{DC} を0Aとした場合の結果である。このときの入力電圧 E_1 ，通流率 α は図10よりそれぞれ $E_1=1675V$ ， $\alpha=0.435$ である。よって，(1)および(9)式より相電流リプル振幅，理論値はそれぞれ68.4A，合成電流リプル振幅の理論値はその3倍である205.2Aとなる。図10より相電流リプル振幅の値は69.7A，合成電流リプル振幅の値は217.5Aであり，理論値と測定値はほぼ一致した。

4.2 製作したリアクトルの電流リプル振幅

製作したリアクトルについても同様に試験を実施した。 $k_0 < k < 0$ （差動結合）を満たすようにした等位相差スイッチングで行った。出力電流の直流成分 i_{DC} を0Aとした場合の結果を図11に示す。このときの入力電圧 E_1 ，通流率 α は図11よりそれぞれ $E_1=1657V$ ， $\alpha=0.38$ である。この場合，(2)および(3)式より相電流リプル振幅，合成電流リプル振幅の理論値はそれぞれ82.0A，81.6Aとなる。図11より相電流リプル振幅の値は82.8A，合成電流リプル振幅の値は72.5Aであり，理論値と測定値はほぼ一致した。出力電流の直流成分 i_{DC} を $i_{DC}=120, 360A$ で行った結果を表1に示す。電流リプル振幅は理論値と測定値でほぼ一致した。直流成分を含む電流における電流リプル振幅の値も $i_{DC}=0A$ の場合に近い値となった。

5. 測定値から見た損失

前章までは電流リプル振幅に着目して，その低減方法について論じた。しかし，実際のチョップ装置にて使用

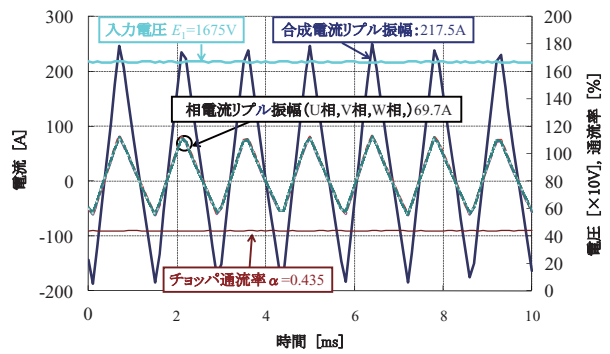


図10 電流リプル振幅（現状）

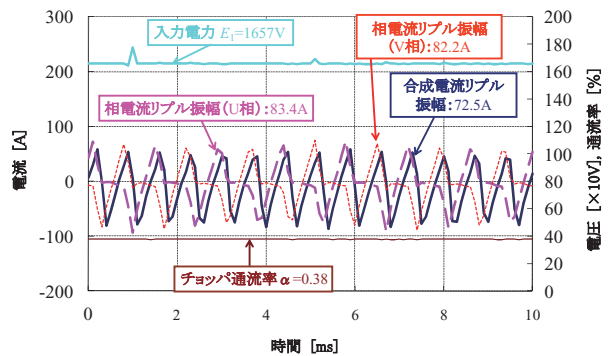


図11 電流リプル振幅（180°位相差かつ差動結合）

表1 電流リプル振幅結果

i_{DC}		3相	差動結合
$i_{DC}=0$	i_{ph_rip} [A]	69.7 (68.4)	82.8 (82.0)
	i_{sum_rip} [A]	217.5 (205.2)	72.5 (81.6)
$i_{DC}=120$	i_{ph_rip} [A]		76.9 (77.1)
	i_{sum_rip} [A]		65.0 (65.3)
$i_{DC}=360$	i_{ph_rip} [A]		74.1 (77.1)
	i_{sum_rip} [A]		63.8 (55.3)

※（ ）内の数字は理論値

する場合は直流電流分を含んだ損失として議論しなければならない。ここで，損失はリアクトル自体に発生する損失と負荷などに発生する損失に分けられる。前者は相電流リプル振幅および直流成分に起因し，後者は合成電流リプル振幅および総直流電流に起因する。n相のチョップについて，リアクトルの抵抗を r ，負荷の抵抗を R とすると直流電流分 i_{DC} を含んだジュール損失は(10)式と示すことができる。電流リプル波形はほぼ三角波と見なせることから三角波の実効値である $1/\sqrt{3}$ を電流リプル振幅に乗じた。(10)式の前項がリアクトルに発生する損失であり，後項が負荷に発生する損失である。

$$W = r \left\{ \left(\frac{i_{DC}}{n} \right)^2 + \left(\frac{i_{ph_rip}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right\} \times n + R \left\{ i_{DC}^2 + \left(\frac{i_{sum_rip}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

リアクトルに発生する損失のみを考える場合は相電流リプル振幅のみを考えればよく，負荷などに発生する損失

特集：車両技術

のみを考える場合には合成電流リップル振幅を考えればよい。しかし、実際には両者とも無視できない場合が多い。両者の影響が同等程度に出る例として $r=R$ の場合について考える。このとき電流の自乗で評価することは損失を評価することと等価となり、(10)式を r で除することで損失指標は以下の通り変形できる。

$$Loss = \frac{n+1}{n} i_{DC}^2 + \frac{n}{3} i_{ph_rip}^2 + \frac{1}{3} i_{sum_rip}^2 \quad (11)$$

(11)式の指標を用いて従来の損失(3相, $n=3$)に対する製作したリアクトル(2相, $n=2$)を用いた場合の損失比を算出する。損失比が1未満であれば電磁結合の活用により損失低減が実現することを意味する。表2に測定値に基づく損失指標を示す。3相における損失指標の算出時は $i_{DC}=0$ のときの電流リップル分に直流成分を加えた値を用いた。一方、2相位相差スイッチングに用いた値は得られた測定値をそのまま用いた。 $i_{DC}=0$ の場合は電流リップル振幅の損失比となる。 i_{DC} が増加するにつれ、 i_{DC} による影響が大きくなり、 $i_{DC} \rightarrow \infty$ とすると1.125に収束した。

直流電流成分が120Aまでであれば、損失比は1未満となり損失低減が可能である。しかし、直流電流成分が360Aとなると、損失比は1を超える。この場合の損失比が1となる損益分岐点は約270Aであった。

本リアクトルは架線集電と車載蓄電のハイブリッド電車を適用対象としている。鉄道総研保有のLH02形電車が距離約300mを最高速度40km/hで発進・停止する際に要する負荷電流(VVVFとSIVの和)の実効値は約270Aである。したがって、本リアクトルを用いて差動結合とすれば、相数低減にも関わらず損失は従来と同等となることが示された。

表2 直流電流成分を加味した損失比

i_{DC}	損失比
$i_{DC}=0$	0.33
$i_{DC}=120$	0.70
$i_{DC}=360$	1.04
$i_{DC}=\infty$	1.125

6. 結論

電磁結合を活用したリアクトルを2相2重電流可逆チョップに適用する場合について、適する電磁結合係数を検討した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 2相電流可逆チョップにおける相電流リップル振幅と合成電流リップル振幅をチョップ通流率および電磁結合係数の関数として導出した。得られた電流リップル振幅について、電磁結合による低減効果を評価するための指標として単相に対する比を導入した。また、

相電流リップル振幅と合成電流リップル振幅を同時に低減できる電磁結合係数が存在することを確認した。

- (2) 2相のリアクトルを一体化し、単独巻と交互巻の部分の設ける構造を考案した。単独巻と交互巻の割合を変えることで任意の電磁結合係数を得ることができることを電磁界解析より明らかにした。
- (3) (1)(2)の試算を元に2相を一体化し、電磁結合係数が約0.5となるようなリアクトルを製作した。製作したリアクトルは実機レベルで電磁結合係数約0.5を実現できた。さらにリアクトルは従来のリアクトル2相分と比較して17%、3相と比較して44%質量低減できた。
- (4) 製作したリアクトルについて、実機の鉄道車両用チョップを動作させ、180°位相差かつ差動結合で電流リップル振幅を測定した。その結果理論値と実測値はほぼ一致した。
- (5) 180°位相差かつ差動結合でチョップ動作させた場合、相電流リップル振幅は70Aから82Aまで12A増加したものの、合成電流リップル振幅を217Aから72Aまで66%の低減が実現できた。
- (6) 試験結果を元に損失を試算した結果、直流電流成分の損失を加味した場合、電気鉄道車両走行時の実効電流相当(270A)までは相数低減にも関わらず合計の損失を低減可能となることが分かった。

得られた知見は、直流-直流変換機器の小型軽量化ならびに損失低減の一助となるであろう。

なお、本研究は経済産業省からの交付金を原資とし実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、NEDO技術開発機構の委託契約に基づき実施したものである。

文献

- 1) 小笠正道・田口義晃・大江晋太郎・廿日出悟・末包洋士・門脇悟志・仲村孝行:「架線・バッテリーハイブリッドLRVの軌道線走行試験結果概要」, 平20電学産業応用部大, Vol.3, pp.187-190, 2008
- 2) 電気学会・半導体電力変換システム調査専門委員会:「パワーエレクトロニクス回路」2000
- 3) 仲村孝行・田口義晃・小笠正道:「リアクトルの電磁結合活用による電流リップル振幅の低減」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-10-98, 2010
- 4) 仲村孝行・田口義晃・小笠正道:「最適な電磁結合係数を実現するリアクトル巻線構造と電流リップル振幅の低減」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-10-191, 2010