

車両技術に関する最近の研究開発

車両制御技術研究部

部長 山本 貴光

1. はじめに

鉄道総研では、「安全性の向上」「環境との調和」「低コスト化」「利便性の向上」の4点を目標に研究開発を進めている。車両技術においてもこの基本方針に沿って研究開発を進めており、本発表では最近の研究開発の中から、「環境との調和」として「走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価」, 「低コスト化」として「高電圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価」, 「利便性の向上」として「粉体肉盛溶接を適用したブレーキディスクの開発」について紹介する。

2. 走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価

在来線電車の主回路において、インバータ装置・リアクトル・断路器などの効率是比较的高く、その損失の多くは、効率が91～93%程度である主電動機が発生しており、消費電力低減を行うためにはこの効率改善が効果的である。本発表ではこの効率改善手法とこの手法を用いた場合の消費電力低減率の試算について紹介する¹⁾。

(1) 誘導電動機の効率改善手法

誘導電動機の効率改善手法として以下の4点について検討を行った。

①低損失材料の使用

最初に、回転子導体について従来使われていた丹銅(4.72 $\mu\Omega\text{cm}$)よりさらに抵抗率が低い銀入り銅(2.37 $\mu\Omega\text{cm}$)を適用することにより回転子導体の損失を約半分に減らすことが期待される。次に、鉄心材料を従来の50A800に代えて35A300を採用することにより、鉄損が3/8となることが期待される。また、固定子巻線電線の絶縁をガラスからカプトンに変更することにより同じ断面積で導体の占積率を向上することができるため、導体の抵抗値を下げ、損失低減が可能となる。これらの改善により定格出力における効率として従来機より1.8%程度の向上が見込まれる。

②固定子巻線の巻回数最適化

固定子巻線の直列巻回数は従来機が72回であったのに対し、試作機では54回に減少した。主電動機の出力は磁束密度と電流密度の積に概ね比例するため、磁束密度が高くできれば電流密度を低減でき、固定子銅損や回転子銅損を低減できる。この結果、効率を更に0.5%向上できるとともに高速域での回生ブレーキ力を向上できる(図1)。

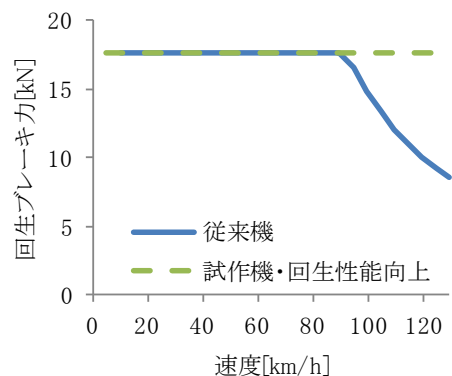


図1 回生ブレーキ力特性の比較

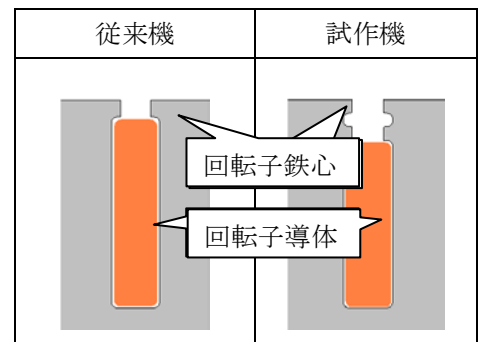


図2 回転子スロット部の比較

③新構造回転子の適用

回転子スロット部には回転子表面付近に導体を配置しないような構造とすることにより高調波二次銅損の低減を図った(図2)。この構造を採用することにより、更に0.4%程度の効率向上が期待できる。

④冷却損失(機械損)の低減

これらの手法を適用することにより大幅に発熱量が少なくなるため冷却性能を低減させることが可能となり、冷却ファンの小型化や冷却損失の低減が可能となる。

(2) 消費電力低減率の試算

都市近郊を走行する直流近郊電車による走行シミュレーションを行い、従来機を使用した場合のエネルギー消費原単位からの削減率について、試作機における効率向上効果による削減率と更に回生性能を高速域で向上した場合の削減率を図3に示す。駅間距離が2km程度までは回生性能向上効果が見られないが、これは駅間距離が2km程度まででは最高速度が回生性能を向上した領域に達しないためと考えられる。

試作機による消費電力削減効果は6~12%程度であり、回生性能向上効果も見込んだ場合は最大24%程度の効果が期待できる。

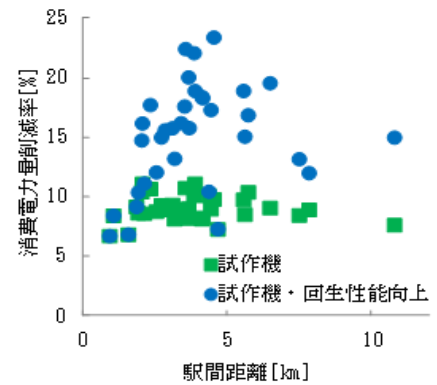


図3 消費電力低減率

3. 高電圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価

鉄道車両において、駆動用インバータ装置(走行用電動機の制御装置)や、補助電源装置(室内灯などのサービス用の電源装置)に使用されているパワー半導体の不具合は、運行に影響を及ぼす場合がある。そのため、装置の保守や更新工事の基礎データとしての活用を目指し、開発段階では予測が難しい経年によるパワー半導体(IGBT)の特性劣化を非破壊で定量的に評価する研究に取り組んでいる²⁾。

(1) IGBTモジュールの劣化評価基準

IGBTモジュールを実使用した後の劣化評価を判定する基準は無いため、モジュール製作時に実施する耐久性試験後の合格判定基準(IEC60747-9)に準拠する。この評価項目・評価基準を表1に示す。

表1 IGBTの劣化評価項目・評価基準 (USL:データシート最大値, LSL:データシート最小値)

No.	評価項目	記号	測定条件	評価基準
1	Diode部 接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)Diode}$	(2)参照	< USL
2	IGBT部 接合部-ケース間熱抵抗	$R_{th(j-c)IGBT}$	(2)参照	< USL
3	エミッターコレクタ間電圧	V_{EC}	$I_E = I_C, V_{GE} = 0V$	< USL
4	ゲート-エミッタ間閾値電圧	$V_{GE(th)}$	$I_C, V_{CE} = \text{データシート指定値}$	> LSL, < USL
5	コレクター-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = I_C, V_{GE} = 15V$	< USL
6	コレクタ遮断電流	I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}, V_{GE} = 0V$	< USL
7	ゲート-エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	$V_{GE} = V_{GES}, V_{CE} = 0V$	< USL

表1のNo.1,2は熱特性、No.3~7は電気的特性の項目である。電気的特性は比較的容易に測定可能でモジュールの健全性判定に良く測定される。熱特性の測定は電気的特性ほど容易では無く、また鉄道車両用IGBTモジュールに対して精度が高い測定方法が確立されていない、という課題があった。

(2) IGBTモジュールの熱特性測定

IGBT モジュールの内部構造は冷却器をベースとして何層かの熱容量($C_{th}[J/K]$)が異なる材料の上に半導体チップが載っている構成となっている。評価項目となっている熱抵抗($R_{th}[K/W]$)はパルス電力 ($P[W]$)を与えたとき、安定した温度を $T[K]$ として $T=R_{th}P\cdots(1)$ を満たす。また、 $T(t_c)=R_{th}P(1-e^{-t_c/\tau})=0.632T\cdots(2)$ であり、温度 T の 63.2%となる時間 t_c を測定すれば、 $C_{th}=t_c/R_{th}\cdots(3)$ より、熱容量 C_{th} がわかる。実際には半導体チップ温度を非分解で測定することができないため、例えば IGBT チップ温度と V_{CE} 間電圧の線形近似性を用いて、温度を算出して使用する。

(3) IGBT モジュールの劣化評価例

使用年数が異なる 2 台の IGBT モジュール DUT-1, DUT-2 (使用年数は $DUT-1 < DUT-2$) に対して劣化評価を試みた。図 4 に電気的特性の代表として表 1 の No.3「エミッターコレクタ間電圧」を示す。その他の全ての電気的特性において 2 台のモジュール共評価基準範囲内であったが、表 1 の No.2「IGBT 部 接合部-ケース間熱抵抗」においては DUT-2 は評価基準外となり、劣化の進行が確認された (図 5)。超音波検査画像で確認したところ DUT-2 モジュールの周辺部位にクラックがあることが確認された。このような結果から、電気的特性からは劣化の進行が確認できない場合も熱特性を測定することにより劣化が認められる可能性があり、予防保全に多いに役立つことが期待される。

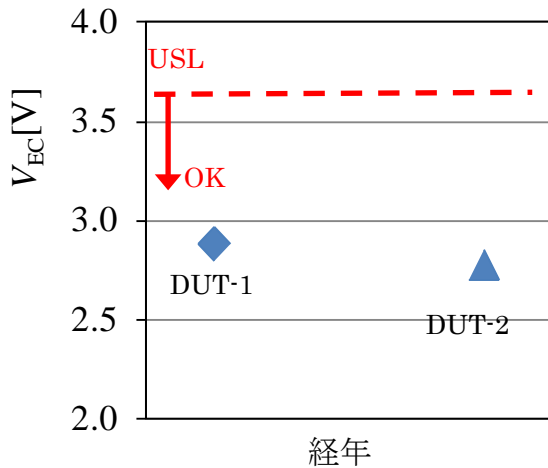


図 4 エミッターコレクタ間電圧

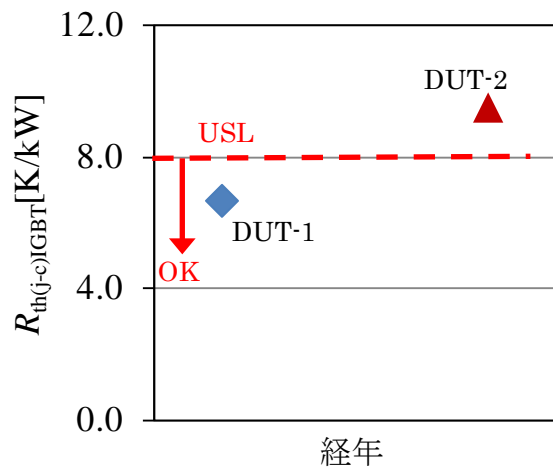


図 5 IGBT 部 接合部-ケース間熱抵抗

4. 粉体肉盛溶接を適用したブレーキディスクの開発

新幹線電車のブレーキシステムでは、通常の高速度走行時は電動機を利用した回生ブレーキ (電制) のみが作用し、ディスクブレーキは基本的に作用しない。しかし、回生失効時や停車時などの非常ブレーキ作用時および緊急ブレーキ作用時はディスクブレーキが作用し、車両の運動エネルギーの大部分をブレーキディスクが熱エネルギーとして吸収し、車両を停止させる必要がある。

(1) 速度向上の課題

初速度 300km/h から非常ブレーキを作用させた場合におけるディスク 1 枚が吸収するエネルギーは 12 MJ である。速度向上する場合、吸収するエネルギーは速度の自乗に比例して増大する。鍛鋼ディスクを初速度 300 km/h から非常ブレーキを繰り返し作用させる台上試験を実施し熱影響調査を行った。この結果、摺動面から深さ方向に進展した熱き裂と新造時には見られない熱影響層が認められた。特に摺動面直下約 0.5 mm までは白色層と呼ばれる変態したマルテンサイト組織が見られた。

(2) 表面改質による熱影響の緩和方法

現在、全ての新幹線に鍛鋼製ブレーキディスクが搭載されている。今回はこの鍛鋼製ディスクに対し、粉体肉盛プラズマアーク溶接 (Plasma Transferred Arc, 以下 PTA 肉盛溶接と呼ぶ) を用いて高耐熱

材を摺動面に肉盛溶接する方法について検討した³⁾。PTA 肉盛溶接の概念図を図6に示す。鍛鋼材の表層に肉盛溶接する素材としては、鍛鋼材との溶接密着性が良いこと、ブレーキ時の摩擦熱による組織変態や大幅な強度低下をしないこと、耐熱性があり、ブレーキ時の入熱を速やかに面内方向へ拡散するような高い熱伝導率を持つことが必要なことから、ニッケル基合金のハステロイC系 (Ni, Cr, Mo, W, Fe, C, Mn, Si) をマトリックスとして選定し、さらに予め微粉を除去して粒径を整えた高融点金属 (W, Mo, Nb, Ta) を混合させた粉体を用いた。

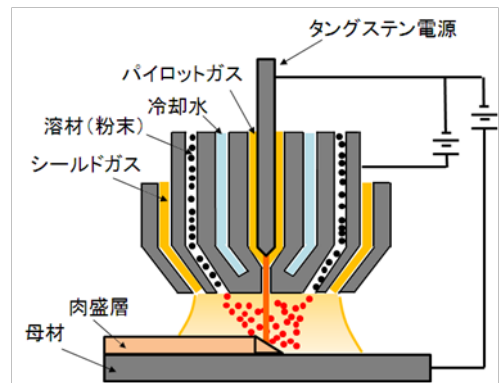


図6 PTA 肉盛溶接の概念図

(3) PTA 肉盛溶接による効果の評価

中央締結型ディスクの摺動面に PTA 肉盛溶接を施工した実物大ブレーキディスクを試作し特性を評価した。試験条件としては、想定車両質量は 50t、常用最大ブレーキ(B7)は初速度 300km/h までの ATC 各速度段、非常ブレーキ(EB)は 300km/h までの ATC 各速度段と 330km/h, 360km/h, 400km/h までの試験を実施した。平均摩擦係数は常用最大ブレーキ(B7)条件で 0.4 以上、非常ブレーキ(EB)条件で 0.3 以上であった。ブレーキ距離についても平均摩擦係数が想定値を上回ったことにより、ほぼ計画値を満足した。ディスク温度に関しては摺動面直下 6mm における温度について目安値である 630℃を下回ることを確認した。締結ボルトの軸力については肉盛なしでの最大軸力 71kN より PTA 肉盛溶接を施した方が低い結果となった。耐摩耗性を確認するため、リジット形状ライニングを用いた初速度 300km/h からの非常ブレーキ試験を 105 回繰り返した際の最大摩耗深さは約 0.75mm であった。その後、等面圧形状ライニングを用いた初速度 400km/h からの非常ブレーキ試験を 40 回繰り返してディスクの摩耗形状を評価した。ディスクの摩耗形状を図7に示す。最大摩耗深さは約 1mm に達し、半径方向に凹凸のある摩耗形状となった。初速度 300km/h からの非常ブレーキを 100 回繰り返した際の鍛鋼製ディスクの摩耗量は 0.35mm 程度であることから肉盛層は約 2.5 倍摩耗しやすく耐摩耗性に課題があることが判明した。

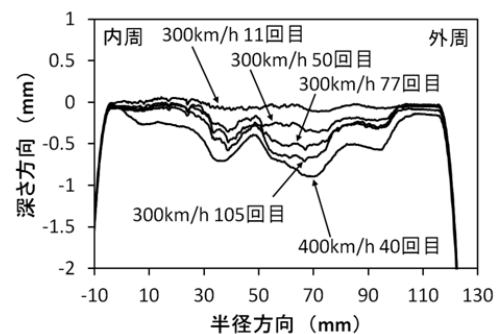


図7 ディスク摺動面の摩耗形状の変化

(4) 今後の進め方

今回検討した PTA 肉盛溶接による表面改質はブレーキ力向上や速度向上した際に発生する熱影響からディスク母材を保護する効果と高速域においても安定したブレーキ性能を維持する効果を有していることが判明した。今後は、PTA 肉盛溶接に代わる新たな肉盛溶接施工法により耐摩耗性向上を図り、実用化に向けた検討を進める。

参考文献

- 1)近藤稔 他, “走行シミュレーションによる高効率誘導電動機の消費電力量評価”, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.47-52, 2013
- 2)福田典子, “高耐圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価”, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.41-46, 2013
- 3)嵯峨信一 他, “粉体肉盛溶接を適用したブレーキディスクの開発”, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.7-12, 2014