

1405 営業線環境を考慮した既存車両での省エネ性能向上と最適ブレーキ性能調整

○ [機] 大橋聡* 田口弘史 生方伸幸 上村一正 下村雄祐 (東京地下鉄株式会社)

草野健一 山下良範 板野康晴 (三菱電機株式会社)

The best brake system adjustment and the Brake-Eco-Performance-System for the service line condition

○Satoru Ohashi, Nobuyuki Ubukata, Hiroshi Taguchi, Kazumasa Kamimura, Yusuke Shimomura (Tokyo Metro Co.,Ltd)

Kenichi Kusano, Yoshinori Yamashita, Yasuharu Itano (Mitsubishi Electric Co., Ltd)

Railway vehicle is the most energy-saving vehicle. To improve a further energy-saving performance in existing cars, We Tokyo Metro have done various adjustments. The performance has been advanced, and the possibility and the technique have been established. The brake performance adjustment considered service line circumstances that it has been the problem so far has been done at the same time, too and the technique of coexisting with the energy-saving performance has been established.

キーワード：省エネ，減速度，空制ブレーキ，回生ブレーキ，制輪子，粘着，

Key Words : energy-saving deceleration, air brake, regeneration brake, shoe pad, adhesion

1. はじめに

JRAIL2008の「営業線環境を考慮したブレーキ性能調整」にて、運転曲線、他車両との性能差、回生絞込時、雨天滑走時等の営業線環境を考慮したブレーキ性能調整の重要性和08系車両での調整内容について述べた。

今回東京メトロでは同内容を活用しつつ、空制減速度の安定化、回生・空制の減速度調整(電空協調)による回生絞込時の延伸制動距離抑制、省エネ性能向上等について、既存の8000系VVVF車両を中心にメーカーと共同で制御・ブレーキ・制輪子等を横断的に調整することで取組み、一定の成果を得ることができた。また雨天時の滑走状況の把握と改善の可能性に関する検討を開始した。本紙ではこれらについて報告する。



図1. 東京地下鉄8000系VVVF車両

2. 8000系VVVF車両での諸問題と解決へ向けて

(1)原因と基本的調整内容

8000系車両においても08系同様、減速度が安定しない、回生絞込時の制動距離の延伸が著しい、車輪のフラット発生の一要因として雨天時の非常ブレーキ使用等の諸問題が確認された。この点においては08系車両での経験から、原因及び改善への調整方法がすぐに判明し、表1の調整を行い試運転結果、乗務員へのヒアリングより概ね良好の結果に至っている。

表1. 8000系VVVF車両調整内容

装置・部位	調整項目	内容
制御	架線電圧リミッタ	絞込開始電圧を1700V →1750V化
ブレーキ	回生ブレーキ力指令 (回生減速度)	電空減速度バランスを表2のとおり調整
	BC圧設定 (空制減速度)	雨天時や100km/hでの制輪子摩擦係数 μ を考慮したBC圧調整、初込圧の調整
	制輪子 (10000系採用制輪子へ変更)	耐水性・耐油性の向上や速度域・温度等に対し摩擦係数が安定

ここでは、まず他車両への影響を考慮しつつ架線電圧リミッタの絞込開始電圧を1750Vに引き上げ回生安定化を目指

*現在、国土交通省鉄道局技術企画課車両工業企画室へ派遣

した。しかし回生絞込を0にすることはできないので、同状況発生時の延伸制動距離の短縮を目指し、回生・空制の減速度バランスを以下の表2を目標に調整した。ここで設計減速度より高めに調整しているのは他車両の性能や高速域・雨天時の減速度低下を考慮したためである。

表2. 調整前後の平均減速度(全制動) [km/h/s]

初速度	40km/h		70km/h		100km/h	
	回生	空制	回生	空制	回生	空制
調整前	4.2	4.0	4.1	3.8	4.0	3.6
調整後	3.9	4.2	3.9	4.1	3.9	4.0

* 全制動時の設計減速度は3.5km/h/s

(2)調整後の回生絞込時の延伸制動距離の抑制

表2の減速度を目標に、表1の調整を実施し、試運転にて強制回生失効を発生させ、その際の制動距離に関する考察を行った。そのチャートを以下の図2に示す。

図2において、そのままフル回生(回生ブレーキ力指令に対し100%回生が作用)であった場合と、強制回生失効を発生させた場合の制動距離の差を同チャートの速度-時間グラフの面積より模擬的に概算した。その結果、一時的に延伸した制動距離約5mに対して、空制>回生としたことでその後短縮した制動距離は約9.7mとなっている。

速度域、回生絞込度合い等によって常に延伸制動距離<短縮制動距離とすることは難しいが、本結果より回生絞込時の延伸制動距離抑制に十分効果があることを確認した。

調整後の回生絞込時の考察 B7フル回生より強制回生失効(粘着リミッタ解除時)

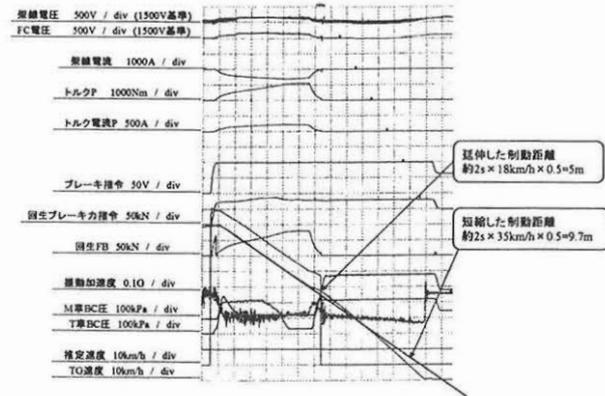


図2. 回生絞込時の延伸制動距離抑制効果

(3)制輪子摩擦係数 μ の安定化の効果

本調整では表1のとおり、制輪子を10000系で採用の物に交換した。同制輪子は副都心線でのATO運転時の停止精度向上を主目的にメーカーと共同開発したもので、油・水・温度等の外乱に対し摩擦係数安定性が高く、表2のとおり各速度域に対する空制減速度の変動幅が従来制輪子よりも抑えられている。

本制輪子の効果により、従来からの特性として避けられなかった高速度域での減速度低下と低速度域での減速度上昇が最小限に抑えられ、速度域による減速度変動のほとんどない回生減速度とのバランス調整が行いやすくなった。まさに電空協調に大きく貢献したといえる。

(4)回生減速度の調整と初込圧の影響

次に電空バランス調整のための回生減速度について述べる。表2の調整前のおり回生減速度が4.0~4.2と高めであった。これを初込圧の影響ではないかと考え、比較のため初込圧を0、30~40kPaとし試運転を行ったので、その結果を以下の表3に示す。

表3. 初込圧と回生減速度の関係(平均値)

初込圧(kPa)	B7	B5
50(調整前)	4.1	3.2
30~40	*3.9	2.8
0	*3.7	2.7

注1:*B7は後述の粘着リミッタ解除時、調整前は16%

注2:数値は全てフル回生時

この結果より、初込圧がブレーキ力として作用し、回生減速度に上乘せとなっていることがわかる。しかし同機能の目的上「車輪踏面に微小に当たっている」ことが必要であるためこれを0とすることはできない。

そこで回生減速度は初込圧の影響も含めた減速度として評価・調整することとし、今回はブレーキ受信器にて初込圧を30~40kPa、制御への回生ブレーキ力指令を数%調整することで目標回生減速度を実現させた。

(5)回生・空制減速度に関する緒言

回生ブレーキは省エネに貢献し、回生絞込・失効が発生しなければ安定した減速度を実現するが、ひとたび回生絞込・失効が発生すると記述の諸問題がつかまとう。ここで、初込圧が回生減速度に上乘せになること、空制は高速域や外乱に対し減速度低下要因を持つことから、回生・空制減速度のバランスに十分留意しないと空制<回生となる傾向が強い。この場合、回生絞込・失効時には制動距離の延伸が発生し、かねてから「回生失効するとブレーキがきかない(ききが悪い)」と言われるので、運転士への精神的ストレスの一因としても指摘されている。

これらの調整は、複数装置の性能が相互影響することから、制輪子、ブレーキ受信器、制御のどの装置がどの程度調整するのか明確でなく思うように進まないのが実情であった。そこで、同諸問題に対しては、舵取りを事業者が行い、各装置メーカーがこの横断的調査に同時に共同参画することで、原因の所在、対策調整箇所等を明確にすることができ、それに基づき各機器が調整することで目標性能の達成に至っている。

3. 既存VVVF車両での更なる省エネへ向けて

地球温暖化防止に対し、自動車の約1/10の二酸化炭素排出量である鉄道への期待が高まっており、そこに大きく貢献しているのがVVVFインバータである。しかしこれまでの知見からその性能を存分に発揮しているか、という点に着目し、この度東京メトロでは既存車両の更なる省エネに取り組むこととした。ここでは特に回生ブレーキの有効活用について述べるものとする。

回生ブレーキの有効利用を低下させてしまう要因としては、以下の表4の要素があげられる。今回は架線電圧リミッタと粘着リミッタに関する部分で更なる省エネを目指した調整を実施した。

表4. 回生負担を低下させる要因

項目	仕様
架線電圧リミッタ	各機器を保護するために一定電圧以上架線電圧が上がらないよう回生トルクを絞込む
粘着リミッタ	雨天時の滑走防止、回生絞込・失効時を考慮して粘着16%程度で回生トルクをリミットする
モータ特性	高速域では負担できる回生トルクは減少する
滑走制御	滑走時、再粘着させるために回生トルクを絞込む

(1) 架線電圧リミッタの高電圧化

本調整については原理的により遠くの負荷まで回生電流を還せることや過去の知見から回生率の向上が期待できた。図3のとおり、東西線05系11次車にて架線電圧リミッタの高電圧化をメーカにて行った。その結果を以下の図4に示す。

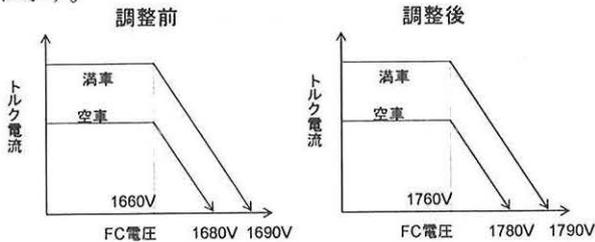


図3. 架線電圧リミッタの高電圧化(05系11次車)

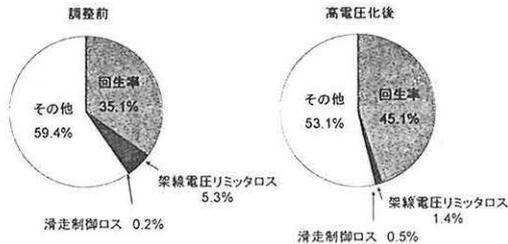


図4. 架線電圧リミッタ高電圧化後の回生率変化

図4は使用した力行電力量を100%として、回生ブレーキによる電力量及び架線電圧リミッタや滑走制御によるロス分、その他として主回路抵抗、駆動装置抵抗、走行抵抗や空気ブレーキ等により有効に作用しなかった回生電力量

を示している。

このグラフより回生率が10%程度上昇し、省エネ性能が向上していることがわかる。

(2) 粘着リミッタの解除

これまで一般的には雨天時の滑走防止、(すべり制御時代の)制御応答性、回生絞込・失効時等を考慮して、回生ブレーキの負担分を粘着係数で16%程度としてきた。

以下の図5に示す粘着リミッタ解除に際し、8000系VVVF車両にて2項の調整を含む各種調整を実施したところ、現在のベクトル制御による高速応答性であれば雨天時の滑走制御において従来と有意差なく制御可能であること、回生絞込・失効時の延伸制動距離抑制も概ね問題ないことが確認できた。

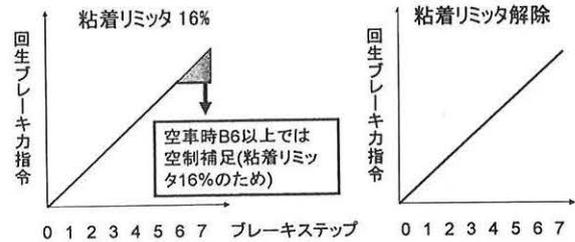


図5. 8000系VVVF車両による粘着リミッタ解除

これによりB7の全制動時も空車時70km/h以下では回生ブレーキにて全ブレーキ力を負担できるようになり、B7の使用やATC全制の比較的多い当該線区では、回生電力量向上が期待できることとなった。その結果及び効果予測を以下の表5,6に示す。(下記結果は同時に架線電圧リミッタの高電圧化を実施しており、その効果も含んでいる)

表5. 8000系VVVF車両 調整後の原単位の変化

	力行原単位 kWh/C/km	回生原単位 kWh/C/km	回生 率%	電力量 削減率	原単位 kWh/C /km
調整前	2.02	0.76	37.7	14.6%	1.26
調整後	1.99	0.93	46.9		1.06

表6. 電気代削減効果予測

原単位差 (kWh/C/km)	電気代 (円 /kWh)	両数 (両)	月平均 走行距 離(km)	今後の 予想走 行月数	削減額 (百万)
0.18	13	90	9000	240	454.90

これより既存車両でも営業線環境を踏まえた機器間協調に十分考慮すれば、架線電圧リミッタ高電圧化と粘着リミッタ解除によって、最適車両性能を確保しつつ、電力量削減の可能性が十分あることがわかった。東京メトロでは今後ベクトル制御車両に対し、順次同調整の推進を検討したいと考えており、対象車両数は約800両となる。

4. 雨天時の各種挙動の把握と改善案

(1) 粘着リミッタ解除時の滑走制御

3項で述べたとおり、省エネを目的に粘着リミッタを解除した。ここで懸念されたのは、雨天時の全制動時の滑走制御挙動と、回生絞込時の延伸制動距離である。

前者について、散水試験にて滑走制御に対する検知閾値、絞込時定数、再粘着後の復帰時定数等を調整し現状と有意差がないことを確認した。また実際の雨天時(10mm/h程度)においても以下の図6のとおり問題ないことを確認した。後者についても図2のとおり問題ないことを確認した。

B7回生 初速110km/h 減速度3.94km/h/s (雨天時、先頭方M車、粘着リミッタ解除)

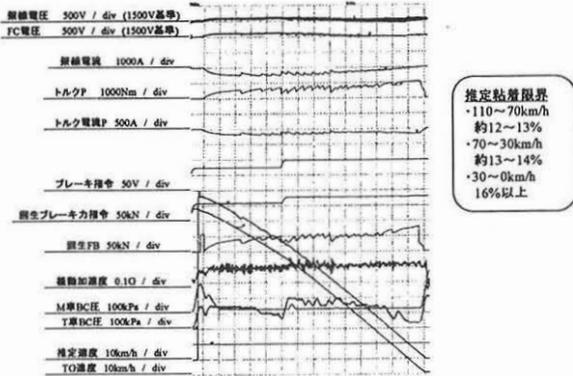


図6. 8000系車両による粘着リミッタ解除試運転結果(B7)
(10mm/h程度の実際の雨天時の先頭から2両目M車)

(2) 雨天時の粘着限界に関する考察

図6で粘着リミッタを解除しても従来と有意差がないことは確認できたが、乗り心地面では極力滑走制御の介入を避けることが望ましい。図6より今回の条件では粘着限界は直線で概ね13%程度であることから、試験的に粘着リミッタを13%として同日の雨天時に試運転を実施した。その結果を以下の図7に示す。

B5回生 初速110km/h 減速度2.84km/h/s (雨天時、先頭方M車、粘着リミッタ13%)

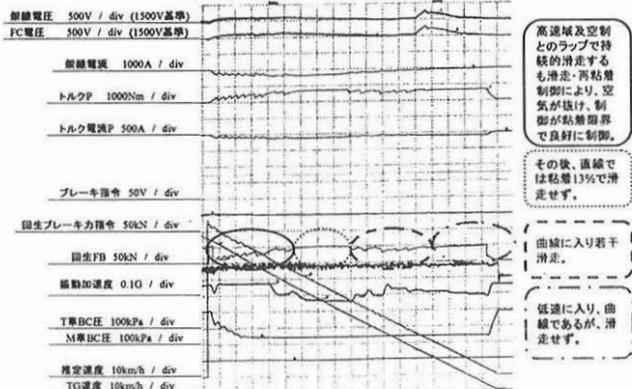


図7. 粘着リミッタ13% 雨天時の試運転結果

本論文では割愛したが、粘着リミッタ13%のB5直線では

滑走はしなかった。しかし図7ではレール踏面に関する諸条件や速度域等で粘着限界が変わっていることがわかる。またR600程度の曲線では粘着限界が8%程度(1両のブレーキ力を車重で除したもので各輪の荷重アンバランスは考慮していない値)まで低下した。これは曲線部での輪重変動や接線力係数の変化が影響していると考えられる。

これより路線条件、速度域、雨量等での粘着限界の推移傾向がわかり、粘着リミッタを適当に設定することで滑走制御介入を最小限に抑え減速度低下抑制や乗り心地確保につながることを確認した。

(3) 今後の雨天時の課題

これらの諸々の結果を踏まえ、雨天時の減速度低下抑制、乗り心地向上等の対策として、号車毎に最適なブレーキ力・粘着リミッタを設定する等の方法の検討・試験を開始し、良好な結果を得つつある。

更には天候の条件等も制御状態に加味するなどにより更なる性能向上を目指すこととしている。

5. まとめ

東京メトロでは営業線で発生している、「ブレーキのきき、安定性」等の諸問題に対し、運転曲線、他車両の性能等を考慮したブレーキ性能調整に取り組んでいる。その中で、使用線区におけるあるべき性能(調整目標)に対して、メーカーと各機器の挙動を横断的に分析することで、従来より課題であった回生・空制の減速度差の原因把握と調整方法の確立を行った。

省エネ性能向上のため架線電圧リミッタの高電圧化と粘着リミッタの解除を行い、回生原単位向上による使用電力量の削減を達成した。ここで重要なことは同調整による弊害を最小限にするため、表1のような機器間協調と同時に行うことである。本手法により東京メトロのVVVF車(ベクトル制御)約800両において更なる省エネ性能向上が期待できることがわかった。

また粘着リミッタを解除しても制御上は問題ないが、雨天時の乗り心地向上のためには「滑走させない」ことを一つの目標に雨天時の挙動把握と対策の検討を開始した。号車ごとの最適なブレーキ力配分や晴天・雨天の切替方法も含めて検討を進める予定である。

本論文にて述べたように東京メトロではメーカーと共同で既存車両での諸問題の解決、省エネを重視した最適車両性能の調整に取り組んでいる。省エネと扱いやすい車両性能は相反する要素も持つため、機器間を横断的に分析・協調させることが重要であり、それにより既存車両でも省エネ・車両性能の両面で更なる向上の可能性を十分持っていることがわかった。これらを引き出すため本取り組みを継続し、更なる発展を目指すことがお客様、社会に対する技術者としての使命と考えている。