

特集：浮上式鉄道の技術と超電導の実用に向けた研究

リニアレールブレーキに向けた インバータレス励磁方法の開発

坂本 泰明* 浮田 啓悟*

Development of Inverter-less Excitation Method for a Linear Rail Brake

Yasuaki SAKAMOTO Keigo UKITA

Studies have been carried out on rail brakes applying linear induction motor technology. This brake is capable of generating braking force without contact. In addition to the aspect of non-contact brakes, no on-board power supply for energizing this brake is required by using dynamic braking. This dynamic braking is performed with an excitation inverter, however another method without using one is desired in order to reduce the cost. Therefore, an inverter-less excitation method using the self-excitation phenomenon of induction generators was devised and tested on a track wheel testing machine. We clarified that the method devised is useful as a low-cost excitation system.

キーワード：レールブレーキ，リニアモータ，励磁システム，コンデンサ自励現象

1. はじめに

鉄道車両における渦電流方式のレールブレーキは、車輪とレールの間の摩擦力（粘着力）に依らないブレーキ力を非接触で発生でき、粘着力が速度の増加と共に減少傾向を示すのに対して、高速域でのブレーキ力の減少が小さいなどの特長を持つ。この非接触のブレーキ力を粘着ブレーキ力に加えることで、走行中の車両をより短距離・短時間で停止させることが可能となるため、緊急事態における安全性を高める手段として期待される。このブレーキについて、筆者らはこれまでの課題であった停電などの電源喪失時の対応策として、リニア誘導モータ（LIM）の発電制動の原理を応用したリニアレールブレーキを考案し、その研究開発を行っている¹⁾²⁾。ブレーキ動作に必要な電力を装置自体の自己発電で賄うことを特長としており、所期の性能を既に確認している。

リニアレールブレーキは、基本的な構成要素として、ブレーキ動作に必要な電力を発電するとともにブレーキ力を発生する電機子、電機子を台車下部にて昇降支持するための搭載機構、電機子に交流を通電するための励磁システム（インバータ）から成る。ここで、リニアレールブレーキの実用性を高めるために低コスト化を図る場合、抜本的な技術置換による低コスト化の可能性のあるのは、上記の3つの構成要素のなかで励磁システムと考えられる。交流電流と自己発電を所定の状態に保つことができる他の励磁方法があれば、高価なインバータを用いる必要がなくなる。

ここで、インバータを用いない励磁方法の候補として、「誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象」が挙げられる。これは、外部から動力を与えられた誘導機にコンデンサを接続すると、誘導機内のコイルとコンデンサで発電作用を伴う共振が起こり、自発的な交流の通流（自己励磁）がなされるものである。リニアレールブレーキは電気機器上の分類では誘導機に該当するため、原理的にはコンデンサ自己励磁現象を起こせると考えられる。しかしながら、一般の回転型の誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象は、無電源からの始動に回転子の残留磁化（磁界を受けた履歴のある回転子鉄心に残る微弱な着磁）を用いるが、リニアレールブレーキでは回転子に相当するレールに残留磁化があることが期待できない。そのため、コンデンサ自己励磁現象の利用は停電時の始動に課題があり、不適と考えられてきた。また、リニアレールブレーキに限らず、筆者らが調べた限りでは、LIMにコンデンサ自己励磁を適用した事例は、残留磁化を使うことが可能な往復運動タイプを除いて無い。

そこで、本稿ではリニアレールブレーキにおいてコンデンサ自己励磁現象を用いる励磁方法を検討した。具体的には、共振コンデンサを予め直流で充電しておき、始動時にこれを放電させることで、回転型の誘導機においては残留磁化が担っている「始動のきっかけ」に利用する方法を考案した。次にこの方法について、始動や停止などの基本動作の検証と速度特性の調査を行った。これらの結果を従来のインバータ励磁と比較評価し、提案方法が低コスト化を実現するインバータレス励磁方法として有用であることを確認したので報告する。

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室

2. リニアレールブレーキの概要

2.1 電機子と搭載機構

リニアレールブレーキは、渦電流方式のレールブレーキの直流電磁石を3相の交流電磁石に置き換え、これをレールと対向するLIMの電機子として用いるものである。図1にその構成例を示す。電機子は台車前後の車輪間の限られた空間に設置され、その長さは最大で1.2~1.5m程度となる。これに対して幹線区間で使用されるレールの頭部幅は65mmであり、LIMとしては非常に細長い形状となる。また、二次側が鉄塊レールであるため、表皮効果によって、比較的低い滑り周波数から磁束や渦電流がレールの内部に侵入し難い状態となる。これらに起因して、リニアレールブレーキをLIMとして見た場合には、漏れリアクタンスや二次抵抗が大きいこと、電流の大きさに対してインピーダンスの非線形性が強いことなどの特徴を示すことになる。

搭載機構は、ブレーキ非動作時は電機子を台車枠直下に上昇させておき、電機子とレールの電磁気的な相互作用が無い状態を保つ。ブレーキ動作時は降下させて、レールとのギャップを所定の値に保持する。

2.2 励磁システム

励磁システムは車体に搭載され、電機子を使って発電制動を行う。ここで、この発電制動のための動作電力や発電電力の吸収を車上の主回路に依存する構成にすると、電系故障や回生失効などの影響が励磁システムに波及する可能性を排除できなくなり、ブレーキシステムとしての信頼性を損なう。そこで、ブレーキ時には主回路から

完全に分離され、独立して動作できる構成としている。

2.3 従来のインバータ励磁

従来の励磁システムはインバータを用いる。図2に1台車当たりの構成例を示す。車両起動時に制御回路電圧(DC100V)などで予め平滑コンデンサを充電しておき、それを初期励磁に利用することで、停電時でも発電制動の始動を可能としている。インバータは始動時に平滑コンデンサの充電電力で3相励磁を開始すると共に、励磁開始直後から得られる発電電力を利用して平滑コンデンサの電圧を上昇させる。この電圧の上昇により、3相励磁の交流電圧が増加し、ブレーキ力が増加する。所定の平滑コンデンサ電圧に到達した後はブレーキ力を保ちつつ、高い滑り周波数(低いインバータ周波数)を動作点として発電電力と回路全体の損失を平衡させ、制動抵抗器などを用いずに平滑コンデンサ電圧を一定に保ち続ける。これを零出力発電制動と呼ぶ。高い滑り周波数を動作点としている理由は、所定のブレーキ力に対するインバータ容量を低減するためである。

上記の零出力発電制動の動作点(滑り周波数)は、一般的な誘導機の可変速制御に用いられるベクトル制御や滑り周波数制御における動作点とは大きく異なり、電機子の入力端子から見たインピーダンス特性もそれとは様相が異なる。特に所定の走行速度を超える高速領域におけるインピーダンスの速度依存性や滑り周波数依存性が小さいことを特徴としている。これらの特徴より、速度情報を用いずに、出力電流*I*のみをブレーキ力指令のパラメータと見なし、それと別個に周波数*f_{ref}*^{*}で発電電力を制御して平滑コンデンサ電圧*V_{dc}*^{*}を整定するという単純な基本制御則を採っている²⁾(図3)。

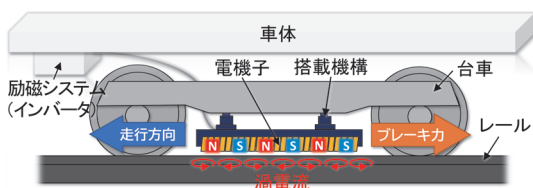


図1 リニアレールブレーキの構成例

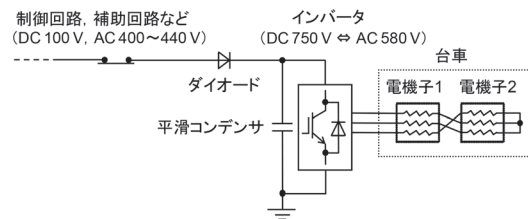


図2 従来のインバータを用いた励磁システム

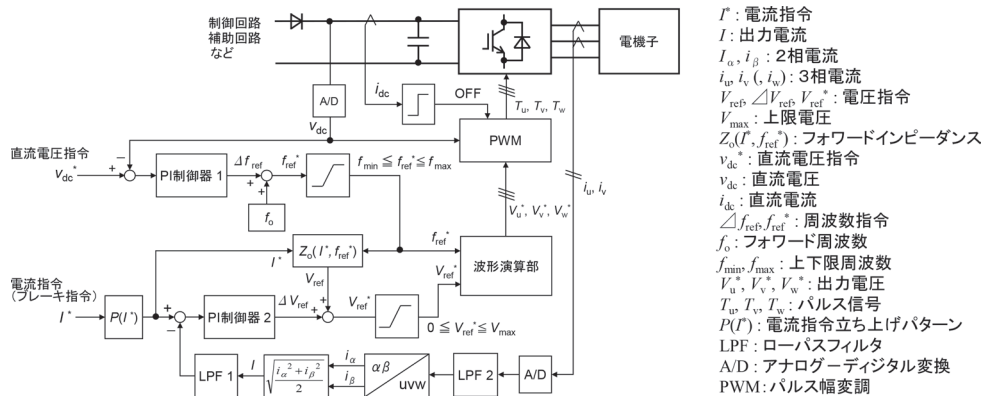


図3 従来のインバータ励磁の基本制御ブロック

- I^* : 電流指令
- I : 出力電流
- I_{α}, I_{β} : 2相電流
- i_u, i_v, i_w : 3相電流
- $V_{ref}^*, \Delta V_{ref}^*, V_{ref}^*$: 電圧指令
- V_{max}^* : 上限電圧
- $Z_o(I^*, f_{ref}^*)$: フォワードインピーダンス
- V_{dc}^* : 直流電圧指令
- V_{dc} : 直流電圧
- i_{dc} : 直流電流
- $\Delta f_{ref}^*, f_{ref}^*$: 周波数指令
- f_o : フォワード周波数
- f_{min}^*, f_{max}^* : 上下限周波数
- V_{u}^*, V_v^*, V_w^* : 出力電圧
- T_u, T_v, T_w : ハルス信号
- $P(I^*)$: 電流指令立ち上げパターン
- LPF: ローパスフィルタ
- A/D: アナログ→デジタル変換
- PWM: ハルス幅変調

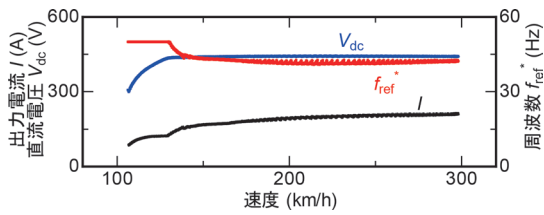


図4 従来のインバータ励磁の速度特性例

このコンデンサ電圧 V_{dc} の整定を行う周波数 f_{ref}^* の変化は、所定の走行速度を超える高速領域では、前述のインピーダンスの速度依存性が小さいことに起因して、速度変化に対して大きなものではない（図4）。

ここで、実用上はブレーキ力を極力大きくするように要求される場合が多く、出力電流指令 I^* は自己発電で流通可能な最大値が指令される場合が多い。この時、交流電圧は最大変調率に固定されて出力されるので、出力電流 I は平滑コンデンサ電圧 V_{dc} を周波数 f_{ref}^* で除した値に概ね比例するようになる。通常、平滑コンデンサ電圧 V_{dc} は一定の指令値 V_{dc}^* に整定されており、周波数 f_{ref}^* は発電電力を調整するように指令されるので、結局、「発電能力が低下（向上）すると周波数 f_{ref}^* が増加（減少）し、出力電流 I が減少（増加）する」のような挙動となる。

3. 低コスト励磁システムの検討

3.1 コンデンサ自己励磁の原理と新たな始動方法

一般の回転型の誘導機におけるコンデンサ自己励磁現象は下記のようなものである。

- (1) 電動機や発電機として使用された履歴のある回転子鉄心には微弱な残留磁化がある。外部動力によりその回転子が回転された場合、磁化が回転することによって電機子回路に交流電圧が誘起される。
- (2) 上記の交流電圧により電機子回路に微弱な交流電流が流れる。ここまでの動作は、永久磁石を用いた同期発電機と同じような原理に依っている。
- (3) 電機子回路にコンデンサが接続されていると、上記の微弱な交流電流は、電機子コイルとコンデンサの共振周波数で誘導機を励磁するように流れ（進み電流）、誘導発電機として動作し始める。
- (4) 発電電力により電流が漸次増加するが、やがて、鉄心の磁気飽和が起り、電流の増加に対して発電電力の増加が伴わなくなる。
- (5) 最終的に、電流は、発電電力と回路全体の損失が平衡する大きさに収束し、それが維持される。

インバータを用いたリニアレールブレーキの零出力発電制動においても、定常動作時に発電電力と回路全体の損失が平衡する点は上記（5）と同じである。この時、インバータは電機子に無効電力を供給する役割を担って

いる。このことから、インバータはコンデンサに置き換えることが可能であり、原理上は上記の自己励磁現象による誘導発電ができると考えられる。しかしながら、リニアレールブレーキにおいては「回転子鉄心の残留磁化」という「始動のきっかけ」がないため、コンデンサを接続しただけでは、自己励磁現象を起こせない。

そこで、共振用のコンデンサを予め直流で充電しておく、励磁開始時に電機子コイルにその充電電力を放出することで、自己励磁現象を誘発する始動方法を考案した（図5）。その手順は、車両起動時に「接触器1投入、接触器2開放」としてコンデンサを充電した後、「接触器1開放」で待機し、励磁開始時に「接触器2投入」とする。ここで、コンデンサ容量については、発電電力と回路全体の損失が平衡する周波数（インバータ励磁における零出力発電制動の平衡周波数と概ね同じ）に、コンデンサと電機子コイルの共振周波数が一致するように選択する。

「接触器2投入」の直後は、コンデンサ充電電力の放出によって、図5の α 軸上で単相交流のように電流が流れる。この単相の交流電流により、電機子とレールのギャップに交番磁界（N極とS極の定在波）が発生する（図6）。ここで、この定在波は、電機子から見てレールの進行方向と同方向に移動する進行波（正相成分）と、逆方向に移動する後退波（逆相成分）が重ね合わされたものである。そして、進行波により誘導発電機としての発電作用が働くため、 β 軸上にも電流が誘導され、3相

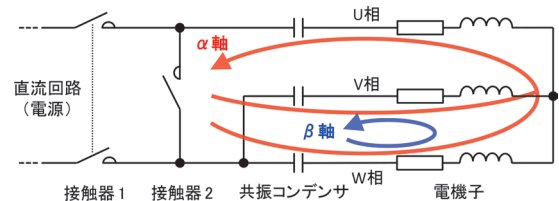


図5 考案したコンデンサ自己励磁の始動方法

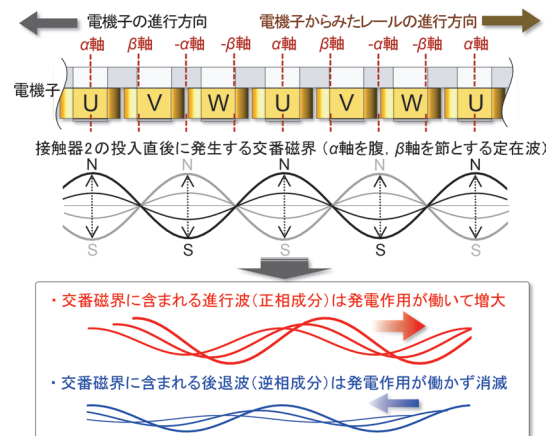


図6 始動時の磁界分布の概念

の正相電流（相順 UVW）が増大する。この増大する正相電流は前記（3）と（4）の電流と同じものであり、最終的に（5）のようになる。一方、後退波には発電作用が働かないため、3相の逆相電流（相順 WVU）は減衰し、最終的には消滅する。

以上、考案した方法は前記（1）～（5）のうち、（1）と（2）の同期発電機と同様な原理の始動プロセスによらずに、（3）のプロセスを逆相電流が重畳された状態で開始するものとなる。コンデンサの充電電圧を高めることによって、「接触器2投入」の直後に流れる電流を大きくすることができるので、（4）の電流増加のプロセスの時間を短縮できる利点がある。即ち、コンデンサ自励現象を用いるブレーキ装置において、空走時間の短縮に有効な始動方法と言える。また、車両起動後にコンデンサの充電を実施し、コンデンサが放電しないように待機すれば、この始動方法はバッテリーなどを用いずに停電時に対応できる。

3.2 励磁の停止と自己保護作用

励磁を停止する場合は図5の接触器2を開放する。これにより、 α 軸の電流は通流できなくなる。一方、 β 軸の電流は通流可能な状態のままであるが、単相交流として通流されるため、発電電力を得られず、減衰して消滅する。このように α 軸と β 軸が別々に励磁を停止する。

また、接触器2にスナバ回路が併設されている場合（後述）は、 α 軸の電流はスナバコンデンサを加えた共振周波数に遷移し、 β 軸の電流と共振周波数が異なるようになる。この場合、2つの周波数の交番磁界が各々の軸上に発生するようになり、発電電力を得られずに減衰して消滅することになる（後述の Δ 接続の場合も同様）。

以上は能動的に接触器を操作する場合について説明したものである。ここで、コンデンサ自己励磁は、電機子コイルとコンデンサで構成される3相の共振回路において、正相成分が所定の状態で通流される場合にのみ持続するものなので、地絡や短絡などの不具合によってその共振状態が維持できなくなると、自動的に通流が停止する。即ち、自己保護作用がある。特に地絡について、励磁中は接触器1が開放されているので、電機子回路の中性点を接地しておけば、自己保護作用で停止するまでの間に流れる地絡電流は必ず電機子コイルを通過するようになり、そのインダクタンスで幾分の限流効果を付与できる。

3.3 基本回路構成

前出の図5は、考案したコンデンサ自己励磁の始動方法を説明したものであった。ここでは、低コストを目的として、下記の条件を満たす回路構成を検討する。

- ・接触器の個数を2（最小）とする。

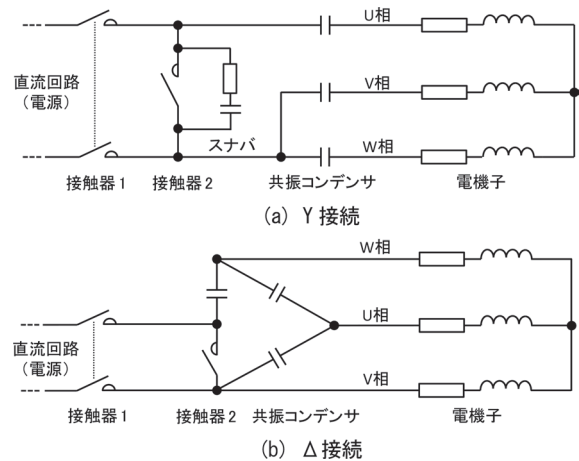


図7 基本的な回路構成例

- ・コンデンサ充電の初期に必要な充電抵抗を、電機子インピーダンスを用いて省略できる可能性がある構成とする。
 - ・自己励磁中に接触器2を開放することにより、自己励磁を停止できるようにする。この際、スナバ回路が不要であることが望ましいが、必要に応じて併設する。
- 以上の条件を考慮すると基本的な回路構成の例として、図7の2案が挙げられる。

図7(a)は、コンデンサをY接続したものである。長所として、コンデンサの初期充電電圧を電機子の定格電圧まで高めて、始動時間を短縮することが可能である。短所として、通流中に接触器2を開放した場合に比較的大きなアークが発生する可能性があるため、スナバ回路の併設が必要である。

図7(b)は、コンデンサを Δ 接続したものである。長所として、通流中に接触器2を開放した場合も、電流の迂回路があるためアークが小さく抑えられ、スナバ回路が不要である。短所として、この構成で初期充電されるコンデンサは1つのみであるが、コンデンサ充電後、始動時に接触器2を投入すると、電機子側へ放電する直前の短時間に、3つのコンデンサの Δ 結線回路内に循環電流が流れ、コンデンサ電圧の分配が起きる。この循環電流は、 Δ 結線回路の寄生インダクタンスでしか限流されないため、その電流値が過大とならないように、コンデンサの初期充電電圧を適当な大きさに制限する必要がある。

以上のように、コンデンサの初期充電電圧を高めて始動時間を極力短くする場合は図7(a)が適しており、他方、スナバ回路の省略により、簡易な回路構成とする場合は図7(b)が適すると考えられる。

3.4 インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の特徴比較

従来のインバータ励磁と考案したコンデンサ自己励磁

表1 インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の比較

	インバータ励磁	コンデンサ自己励磁
始動時の動作	・平滑コンデンサの直流の充電電力を使って、3相回路に正相電流を通流	・共振コンデンサの直流の充電電力を使って、3相回路に正相と逆相が重ね合わされた単相交流を通流
定常時の動作	・平滑コンデンサ電圧を一定に維持するように周波数を制御 ・周波数の増加(減少)で発電電力が増加(減少) ・周波数の増加(減少)で電流が減少(増加)(最大変調率出力時)	・共振周波数において、発電電力と損失が平衡するように電流の大きさが自然収束 ・電流が減少(増加)することで、損失に対して発電電力が相対的に増加(減少) ・電流が減少(増加)すると、磁気飽和状態が変化し、共振周波数が減少(増加)
長所	・ブレーキ力制御などの高度な制御が可能 ・停車中の試通電や走行中の電機子の状態監視などの機能付加が可能	・システム構成の簡素化とコスト低減に有利 ・質量低減の可能性がある ・無制御なので信頼性が高い ・スイッチングによる EMC ノイズが無い ・インバータより損失が少なく、ブレーキ性能が高い
短所	・コスト最小化には不利 ・スイッチングによる EMC ノイズに留意する必要がある	・停車中の試通電(コンデンサから電機子への放電)で確認できる事柄が限定的 ・電機子の状態監視には工夫が必要(要検討)

について比較した結果を表1に示す。同表より、「始動時の動作」は、逆相成分の有無があることを除けば、両者で似ていることが分かる。他方、「定常時の動作」については、電流の大きさ、周波数、発電電力の因果関係が両者で異なっている。特に周波数の増減と発電電力の増減の関係が両者で逆になっていることが特徴的である。即ち、速度の大幅変化やギャップ変化のような発電能力に直接影響するような状態変化が生じた場合においては、インバータ励磁とコンデンサ自己励磁の挙動は異なることになる。

4. 検証試験

4.1 試験機材

前章のコンデンサ自己励磁の動作を軌条輪試験¹⁾で検証した。リニアレールブレーキ電機子は、軌条輪試験のために円弧形状とした試作機(図8(a))を用いた。これは防護カバーなどを含めて直線形状換算で長さ1500mm以下、幅125mm以下、高さ130mm以下で設計された実機大のプロトタイプである。磁極ピッチは約200mm、標準ギャップは約8mmである。また、試験に用いたコンデンサの容量は、インバータ励磁による零出力発電制動と性能比較できるように、その交流電圧、交流電流、周波数から求められる等価キャパシタンスに合わせ1相当たり6mF(Y接続)または2mF(Δ接続)とした。また、この供試コンデンサは、インバータ励磁の電圧を上回る電圧によって、ブレーキ力増強と容量低減に対応させた試作品である。その仕様においては、1相当たり0.5mF(Δ接続)となり、3相分をまとめた外

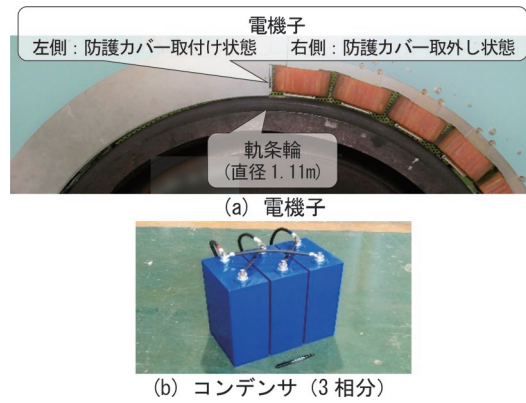


図8 試験機材の外観

寸法は約350mm×200mm×300mm、質量は約40kgである。その外観を図8(b)に示す。

基本的な試験方法は、軌条輪の速度を回転軸に直結されたモータで所定値に設定し、ブレーキ動作が開始されたら、同モータで軌条輪の速度を停止まで下げた。その間、コンデンサ励磁の起動特性と速度特性を取得した。

4.2 始動試験

コンデンサを初期充電した後、軌条輪を停止した状態(0km/h)と300km/hで回転させた状態で接触器2を投入した場合の電流波形を図9に示す。停止状態では、放電電流はα軸上で減衰する単相交流のように流れ、消滅している。一方、300km/hでは、接触器2を投入した直後はα軸上で単相交流のように流れているが、すぐにβ軸上でも流れ始めて3相交流のようになり、振幅が増加している。これより前述のように逆相成分が減衰し、正相成分が増大していることが確認できる。同様の始動

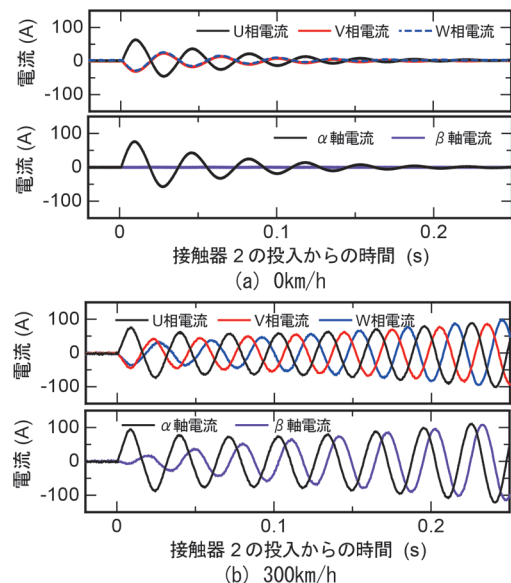


図9 始動時の電流波形(Y接続, 初期充電DC100V)

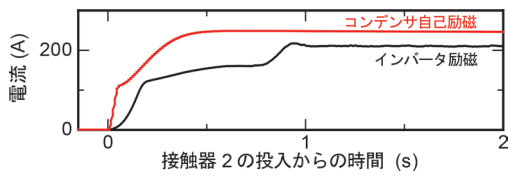


図 10 始動時の電流立ち上がり (Y 接続, 初期充電 DC300V)

試験における電流実効値の立ち上がりをインバータ励磁と比較したものを図 10 に示す。ここでは共振コンデンサと平滑コンデンサの初期充電電圧を揃えている。同図より、コンデンサ自己励磁の電流は約 0.3 秒 (0-90%) で立ち上がり、その後は一定値となるのが分かる。コンデンサ自己励磁の立ち上がりが実用上十分に速いことが確認できる。なお、インバータ励磁の立ち上がりの速さは、平滑コンデンサ容量などが関係するため、一般論として評価できないが、コンデンサ自己励磁の立ち上がりの速さは概ねインバータ励磁と同等かそれ以上であると言える。

4.3 停止試験および自己保護試験

速度 300km/h において、コンデンサ自己励磁 (Δ 接続) で通流中に接触器 2 を開放した時の電流波形を図 11 に示す。接触器 2 の開放直後、2 つの周波数が混在した後、約 0.4 秒で電流が減衰、消滅している。前述のように α 軸と β 軸の共振周波数が異なることで、2 つの単相交流となり、自己励磁が継続不能となって停止している。なお、接触器 2 の開放時のアークが小さいことを複数試番で確認した。また、コンデンサ Y 接続にスナバ回路を設けた場合の停止試験の結果も、図 11 と同様であった。

図 12 に、コンデンサ自己励磁 (Δ 接続) で通流中に、接触器 2 を投入したままで電機子の入力端子 (対地電位が最も高い部分) の 1 箇所 (W 相) を人工的に地絡させた場合の電流波形を示す。ここでは、最も厳しい条件として、接地抵抗と地絡抵抗を用いずに、直接接地で完全地絡としている。同図より、地絡直後に定常電流の最大 250% 程度の地絡電流が 3 サイクル以内 (約 20ms) だけ流れるが、すぐに消滅していることが分かる。その後、地絡発生から約 0.3 秒までに励磁が停止している。このことから、万一の地絡発生時に、保護動作である接触器 2 の開放が仮に何らかの原因で遅れた場合でも、この自己保護作用によって、速やかに励磁が停止されることが分かる。

4.4 速度特性

図 13 に速度 300km/h で励磁を開始した場合の速度特性をインバータ励磁と比較して示す。コンデンサ自己励磁は無制御でありながら、能動的な制御を行っているイ

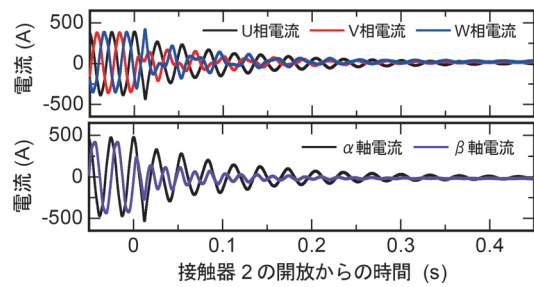


図 11 停止試験 (Δ 接続)

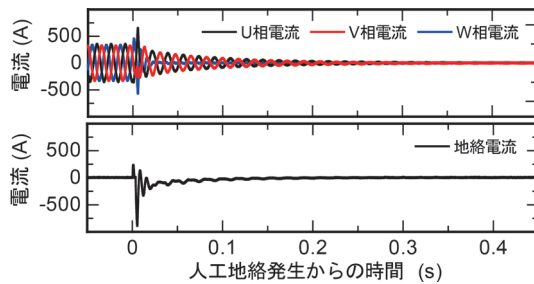


図 12 人工地絡に対する自己保護試験 (Δ 接続)

ンバータ励磁より広範の速度域で励磁できている。高い滑り周波数を動作点としているため、発電の調整において速度変化に伴う周波数の調整が少なく済むことが、共振周波数で動作するコンデンサ自己励磁に好適であることが分かる。詳細には、速度低下に伴い、発電能力が低下して電流が徐々に減少しているが、その程度は発電能力の低下を周波数の増加で補うインバータ励磁と同等である。また、電流の減少に伴い、磁気飽和が緩和されて共振周波数が低下している。これはインバータ励磁の周波数の動きと逆であるが、特に低速領域 (約 110km/h 以下) では滑り周波数が低下し過ぎないように働くため、より低速まで励磁するのに好都合となっている。また、コンデンサ自己励磁のほうが全体的に大きな電流が流れ、大きなブレーキ力を発生している。これはコンデンサ自己励磁では、通電時の損失が小さく、発電電力を通流のための電力として効果的に利用できるためである。

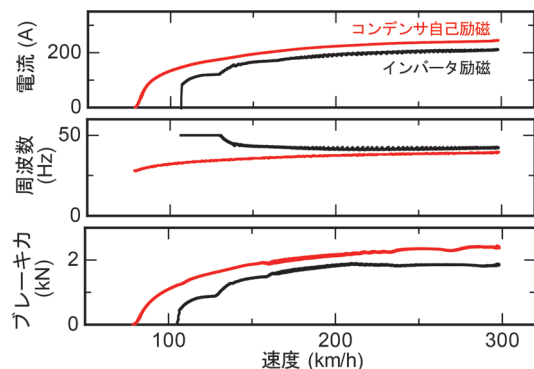


図 13 速度特性 (Δ 接続, 最大交流電圧 300V)

以上より、励磁可能な全速度領域において、コンデンサ自己励磁のブレーキ性能がインバータ励磁のそれを上回ることが確認された。

5. まとめ

リニアレールブレーキの低コスト化を目的として、コンデンサ自己励磁現象を用いた新たな励磁方法を考案し、軌条輪試験で性能を検証した。従来のインバータ励磁と比較して、始動が同等かそれ以上に速く、速度特性についてもより広範の速度域において励磁が可能であった。また、励磁可能な全ての速度において、インバータ励磁よりも大きなブレーキ力を発生した。これらより、

始動、停止、速度特性の何れも実用に適うことを確認した。従来の励磁システムにおけるインバータをこの方法で代替することで、大幅な低コスト化を実現できると見込まれる。

文 献

- 1) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 狩野泰: 軌条輪を用いたリニアモータ型レールブレーキの性能試験, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.35-40, 2011
- 2) 坂本泰明, 柏木隆行, 米山崇, 嵯峨信一: リニアモータ型レールブレーキの開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.23-28, 2013