

# 新交通システムの電力設備に関する 設計手法と検証（交流方式）

Design and Verification Technique to Power Supply System  
for Three-Phase AC Based New Transit Systems

技術本部 相場謙一\*1 森本雅之\*2  
三原製作所 川上哲夫\*3 尾西京太郎\*4  
東京臨海新交通株式会社 依田和雄\*5

新交通システムは、バスと鉄道の中間的な位置付けの輸送機関であり、低コストで輸送力を確保する手段として用いられている。空港のアクセス、都市部の短距離輸送などに国内外で多数の実績を有している。3相交流き電（給電）方式を採用した東京臨海新交通 臨海線（ゆりかもめ）は、世界で初めて長大な吊橋の上を走行する。ところが、新交通システムのき電には指針により低電圧を用いているため、き電変電所を設置できない吊橋の部分で、電圧降下によって車両のパンタ点電圧が最低電圧を下回ることが懸念された。これに対して、新たに車両の位置を考慮した電力シミュレーション法を開発して電力設備の設計を行った。ゆりかもめは、問題もなく開業後1年半順調に運行している。

The Waterfront Line of the Tokyo Waterfront New Transit is the world's first automated people mover system, which runs on a long suspension bridge. The new transit system uses a low voltage, three-phase AC feeding system according to the New Transit System's guideline. We developed a simulator for the electric power feeding system in which the vehicle's position is considered. The simulator is used for the design of the electric distribution system, in order to avoid low voltage at the suspension bridge. This paper describes the distribution line system of the Tokyo Waterfront New Transit Waterfront Line and the electric power simulator used for the design. By using the newly developed simulator, the Yurikamome, Tokyo Waterfront New Transit Waterfront Line, has been in operation safely since October 1995.

## 1. はじめに

新交通システムは、バスと鉄道の中間的な位置付けの輸送機関であり、低コストで輸送力を確保する手段として用いられている。すなわち、車両はゴムタイヤを有し、ガイドウェイに沿って走行するもので、快適性、低公害性、安全性に優れている。空港のアクセス、都市部の中量輸送として国内外で多数の実績を有している。

走行する車両に電力を供給するき電（給電）には、交流と直流がある。交流方式と直流方式の比較<sup>(1)</sup>を表1に示す。新交通システ

ムのき電には、絶縁等の安全を考慮して低電圧を用いることが指針により定められているため、比較的路線長が長く車両が少ない場合に直流方式が有利になり、逆に短い距離を多くの車両で輸送する場合は交流方式が有利になる。

現在運用中の新交通システム電力方式の一覧<sup>(2)</sup>を表2に示す。路線ごとに種々の観点から電力方式が選定されている。

平成7年11月に開業した東京臨海新交通臨海線（以下、ゆりかもめと称す）は、新交通システムとして初めて長大な吊橋の上を走行する。吊橋の部分では、き電変電所の間隔が長くなり、電圧降下が大きくなりやすい。そのため車両の運行に支障がないように電力設備を決定する必要がある。

本報では、ゆりかもめの電力設備の概要に触れ、次に当社が新たに開発した3相交流き電方式のシミュレーション法とシミュレーション結果の電力設備設計への反映状況について述べる。なお、3相交流き電方式の新交通システムの高調波まで対象としたシミュレーションは世界初の取組みである。

## 2. 東京臨海新交通の特徴

ゆりかもめは、図1に示すように新橋～芝浦ふ頭、レインボーブリッジを経由して有明までのウォータフロントを結ぶ全線複線の12駅、全長約12kmの高架式路線である。大きな特徴として途中にレインボーブリッジを有し、さらに橋上で最大こう配50%となっている。

運転は、自動列車制御装置（ATC）と自動列車運転装置（ATO）による完全無人運転となっている。

表3にゆりかもめのシステム諸元を示す。最高速度60km/h、最大加速度・常用減速度3.5km/(h·s)と大きな輸送需要にも対応

表1 新交通システムのき電方式  
Feeding of new transit system

		三相交流 600 V 方式	直流 750 V 方式
き電変電所設備	数	多い（直流方式の約2倍）	少なくとも良い
	内容	トランスのみ （高調波対策等が必要）	トランス、整流器、インバータが必要
軌道上設備	電車線	3本、離隔距離は小さい （約45mm）	2本、離隔距離は大きい （約90mm）
	き電線	電圧降下が大いなので必要	電圧降下が小さいので不要
車上設備	内容	サイリスタレオナード方式 トランスのみで良い 集電子3個/1箇所	サイリスタチョップ方式 インバータ又はMGが必要 集電子2個/1箇所
	き電空間	直流式に比べれば小さい	車上搭載機器が多いので大きな空間が必要
	重量	直流式に比べれば軽い	車上搭載機器が多いので重くなる
コスト	地上設備が高くなるが、車両は安くなる 路線が短く需要が多いほど有利	車両は高くなるが、地上設備が安くなる 路線が長く需要が少ないほど有利	

\*1 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター

\*2 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター主務 工博

\*3 電子制御部機械・プラント制御設計グループ主務

\*4 電子制御部機械・プラント

制御設計グループ

\*5 技術部電気課電気課長



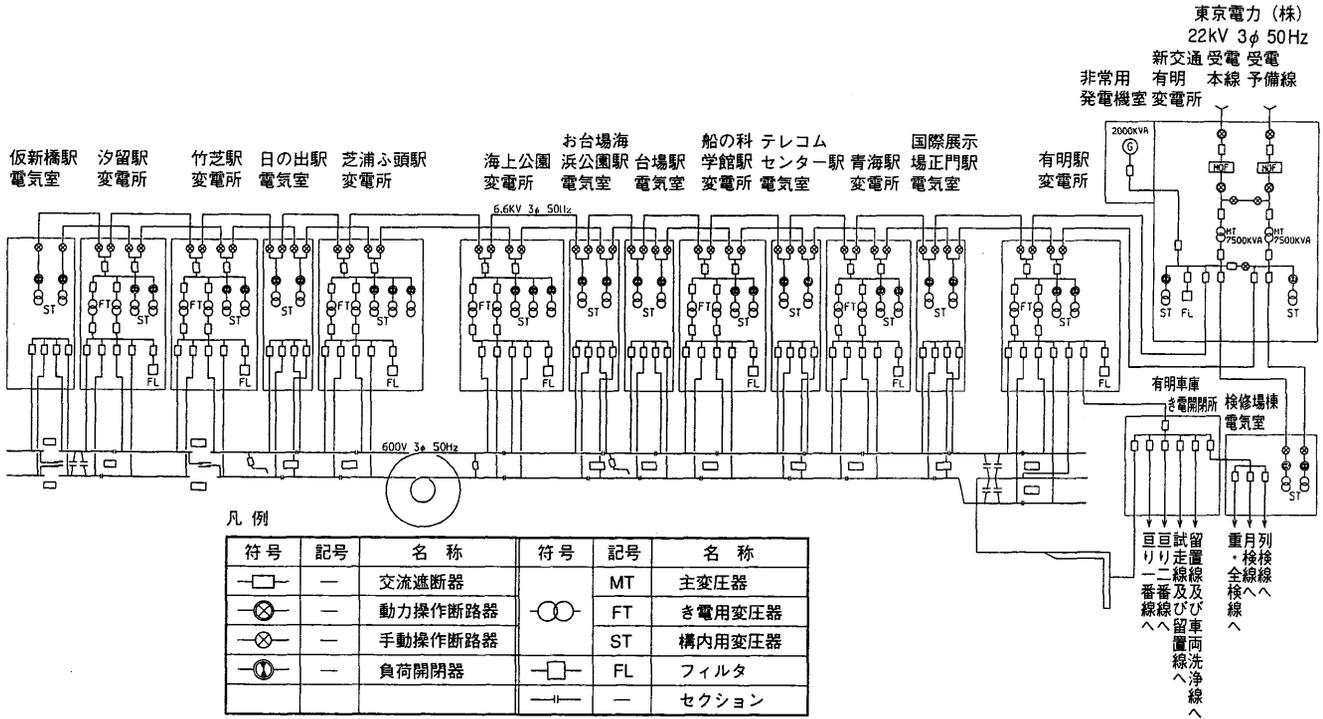


図2 電力系統図 ゆりかもめの電力系統を示す。1箇所の受電変電所と7箇所のき電変電所から成る。 Distribution line system

析を行う必要がある。

### 3. 電力シミュレーション

複数の車両が同時に力行・回生を行うと電車線を通る電流が大きくなり、電車線のインピーダンスによる電圧降下が発生し車両が受電するパンタグラフでの電圧（パンタ点電圧）が下がる。これにより、車両の性能が維持できなくなる可能性がある。さらに、き電変電所のトランスが過負荷とならないようにすることも必要である。

そのため、このようなことが起らないように、き電変電所の間隔や容量を決定することが必要である。その一つの方法として、電気学会で公表されている計算方式<sup>(9)</sup>があるが、この方式では車両は、均一に存在するとして扱っている。すなわち、駅間の車両数は駅間長と運転間隔から決定している。ところが、ゆりかもめでは路線の起伏が多く、力行・回生が頻繁に発生し、さらに駅間距離が短いので、車両を均一的に扱うには問題がある。すなわち、運行ダイヤによって決められる車両の組合せ次第で電圧が異なってしまう可能性がある。そのため、運行ダイヤの組合せを変えて、最もパンタ点電圧が下がったときでも車両に必要な電圧を確保できるようにしなければならない。そこで当社では、新たに3相交流き電方式の電力シミュレーション法を開発し、路線全体の電力シミュレーションを実施した。

電力シミュレーションは、図3に示す手順に沿って行う。路線の形状や車両の特性を入力した車両走行データファイルと仮の計画に基づいた、き電トランスや電車線のインピーダンスを入力したファイルからメインルーチンによって計算を行う。

メインルーチンは、以下の①～⑥を実施する。

- ① インピーダンスファイルから接点電圧方程式を立てる。
- ② 車両走行データファイルから車両位置と速度の関係を表すランカーブを決定し、車両の位置や電流量を求める。車両は電流源とみなすことができる。

- ③ ①の接点方程式に②の電流源を接続し、解を求める。
  - ④ 方程式の解から各車両のパンタ点電圧とき電変電トランスに流れる電流を求める。
  - ⑤ 運転間隔を任意の数に分割して、その時間だけ経過したときの車両の状態を再度計算する。
  - ⑥ 上りと下りの車両の位置関係をずらして、最もパンタ点電圧が下がる場合やき電トランスに最も電流が流れる場合を求める。
- 電力シミュレーションプログラムの計算結果は、電流計算結果、電圧降下計算結果、容量計算結果のファイルの形で求められグラフ化を行う。

実測値と比較しやすいように1編成のみが駅間を走行している場合に片側駅のき電変電トランスに流れる電流の実測結果とシミュレーション結果を図4に示す。シミュレーション結果と実測結果はほぼ一致しており、高い精度を有していることが分かる。

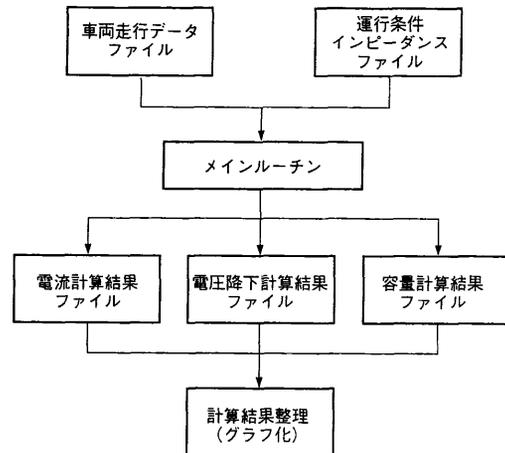


図3 シミュレーション構成フロー 電力系統の条件と車両の走行条件から、電流、電圧及びトランスに必要な容量を求めることができる。 Flow chart of simulation

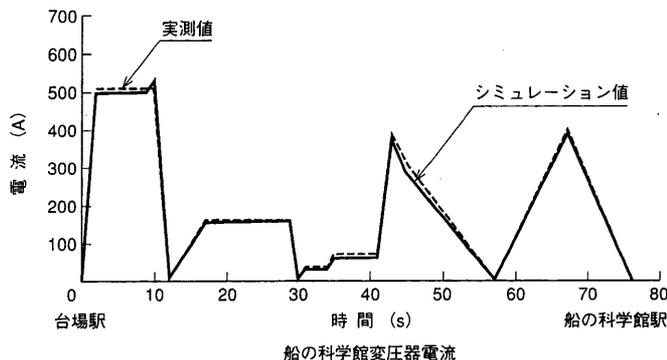


図4 電力シミュレーション 車両が台場駅から船の科学館へ向かって走行しているときの、船の科学館のき電変電所の電流を示す。実測波形と良く合っている。  
Result of electric power simulation

このシミュレーションの結果を設備設計にフィードバックして受電・き電トランスの容量や電車線などの設計を行うことで、適切な容量の設備を決定することができる。

#### 4. 過渡シミュレーション

ゆりかもめの車両はサイリスタ変換器を備え、交流を車両内で整流して直流モータを駆動している。

サイリスタ変換器では直流電流をサイリスタによって切替えるので、交流電流には高調波電流を含むことになり、サイリスタ変換器は高調波電流源となる。変換器の発生する高調波電流は、理想的なスイッチングを行っていても発生する理論高調波 ( $6n \pm 1$  次) と点弧角のばらつきや電流の変化によって発生する非理論高調波 ( $6n \pm 1$  次以外) から成る。これらの高調波が交流系統に流出するとさまざまな問題が発生する恐れがある。

理論高調波は、高調波のほとんどを占めるが、その発生量は理論的に求められる。それに対して非理論高調波は高調波に占める割合は本来わずかであるが、サイリスタ変換器により非線形的に増大することがある。このため、過渡的なシミュレーションにより求めることが必要となる。

シミュレーションには、はん用の回路シミュレータである PSpice (© MicroSim Co.) を用いた。PSpice を用いることにより、従来のき電シミュレータのような静的な解析ばかりでなく、高調波やモータの負荷電流が過渡的に変化するジャークのような動的な状態までの解析も可能になる。

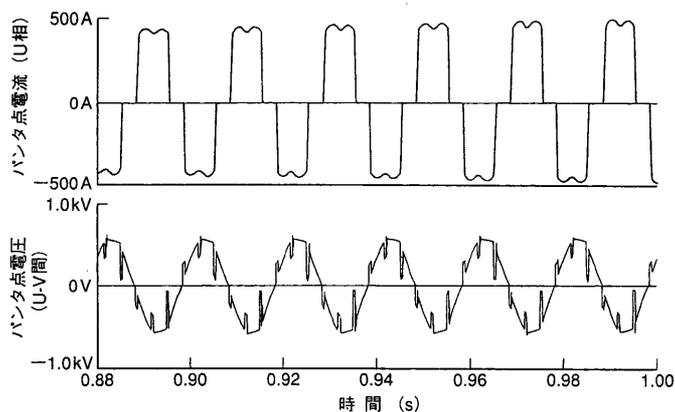
モデル化に当り、電車線 (トロリ線及びき電線) の 600 V を基準として高圧系統はそれぞれ換算して回路網を作成する。

回路作成に当り各機器の定数は次のように決定した。

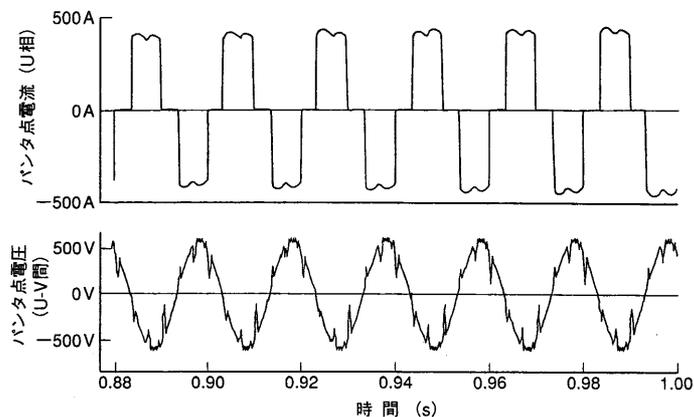
- 受電トランスとき電トランス : 工場実測値
- 電車線, 高圧配電線等電線 : 距離に比例した値
- 電力フィルタ : 設計値

サイリスタ変換器の主回路はそのまま PSpice モデルとし、車両の制御系は点弧角の制御が可能な等価モデルとした。ただし、車両の回路定数を基にモデル化している。このため、PSpice モデルで記述された電力系統の任意の位置に任意の数の車両の PSpice モデルを自由に配置し、シミュレーションを行うことができる。

駅間で車両がブレーキを掛けたときの車両のパンタグラフを流れる電流 (パンタ点電流) とパンタ点電圧のシミュレーション結果と実測結果を図5に示す。サイリスタ変換器等の車両機器と電力系統を合せてシミュレーションを行っているので、シミュレーション結果と実測結果はほぼ一致している。シミュレーションに



(a) シミュレーション結果



(b) 実測結果

図5 過渡シミュレーション レインボーブリッジ上ブレーキ作動時の車両のパンタ点電圧及び電流波形を示す。実測波形と良く合っている。  
Result of transition simulation

より、発生する非理論高調波は問題となるような量が発生することはないことが明らかになった。

今回開発した過渡シミュレーション手法によって、次のようなことを容易に行うことができる。

- ① サイリスタ変換器の電流波形が容易に得られる
- ② 高調波解析が可能
- ③ 車両動作のモデル化が可能
- ④ 動的な過渡現象が模擬可能

さらに、はん用シミュレータによりシミュレーションが容易に行えるので、これ以外にも各種の解析が可能と考えられる。

#### 5. おわりに

本報では、新交通システムの3相交流き電方式のシミュレーションを実施し、電力系統の解析を行った結果を述べた。これによって電力の変化の大きい系統に対して過不足のない設備を設計することができた。

この成果を今後の新交通システムの設計に活用していく。

#### 参考文献

- (1) 日本交通計画協会, 「新交通システムの標準化とその仕様」の策定に関する検討資料 (1983) p.58~63
- (2) 水間 毅, 新時代を迎える都市交通システム 第2章, 電気学会論文誌D Vol.113 No.6 (1993) p.718~721
- (3) 電気学会 電鉄用変電所専門委員会, 電鉄用変電所の間隔と容量の合理的決定方法について, 電気学会技術報告第21号 (1957)