

中量軌道輸送システム大阪南港ポートタウン線の電力設備

Substation Equipment for High Power Three-Phase AC Electrified Automated Guideway Transit of OSAKA-NANKO Port Town Line

大阪市交通局の中量軌道南港ポートタウン線は、新しい都市交通ニーズに対応した中規模輸送の新交通システムとして、省力化、安全性、経済性、環境性などの面で多くの特徴をもっている。

電力設備の面からみても、低圧三相交流き電方式、電車用電動機の制御に可逆式サイリスタレオナード方式を採用したことによる力率改善と高調波対策など、新技術が採用されている。本論文では、中量軌道南港ポートタウン線の電力設備の概要と、低圧三相交流き電方式による電力システム設計のため新しく開発した電力シミュレータによる電力、高調波シミュレーションについて述べる。

木村 繁*
小山一平**
大鋸英五***
斉藤国夫****
上西健雄*****

Shigeru Kimura
Ichihei Koyama
Eigo Ōga
Kunio Saitō
Takeo Uenishi

1 緒 言

中量軌道輸送システムの電力設備をいかに最適設計するかは、電気方式の選定に加えて、システム中の時々刻々の電気量の変化をいかに正確に実情に合った形で予測するかにかかっている。特に低圧三相交流き電方式では、

(1) 時々刻々変化する負荷点位置、その電流と力率によって変電所を通る電力を把握し、設備容量を最適化する。

(2) 運転中の列車のすべての位置でのパンタグラフ電圧を把握し、電圧変動値を最適化する。

(3) 車両から発生する高調波電流の予測と対策方法が重要であり、本稿で述べるシミュレーションの目的となる。

2 中量軌道輸送システムの電気方式

従来の鉄道電化は直流き電方式が大半で、交流き電方式の場合でも単相方式で、その目的が長距離大量輸送のため20～30kVに高電圧化されている。

中量軌道輸送システムとして、何が最適かは議論の生ずるところであるが、省エネルギーのニーズから電力回生車採用の条件で比較したとき、経済性では大差がないものの、当初計画時点の比較検討では、車両搭載電気品寸法の面で直流方式が交流方式よりも占有面積が大きく、重量も重くなるので、

小形・軽量車両による中量軌道本来の目的に合わせることが、本システムでの低圧三相交流き電方式採用の大きな理由である。

3 南港ポートタウン線の概要

大阪市交通局中量軌道南港ポートタウン線は、大阪湾を埋め立てて建設された港湾、流通施設と人口4万人の居住地区をもつ人工島ポートタウンの中ふ頭駅～地下鉄四つ橋線住之江公園駅を結ぶ全長6.6kmの中量軌道輸送システムである。

車両は図1に示すように、4両編成(将来6両)のゴムタイヤ走行車で、三相交流600Vで受電し、可逆式サイリスタレオナード制御による直流電動機駆動である。

表1に主な諸元を示す。

4 電力設備とき電方式

図2に南港ポートタウン線の電力系統図を示す。

4.1 受電変電所

中ふ頭駅～住之江公園駅間6.6kmのほぼ中間に受電変電所が設置され、関西電力株式会社から22kV 2回線で受電し、5,000kVA×2バンクの受電変圧器により6.6kVに降圧後、各



図1 南港ポートタウン線の車両 車体は耐食性に優れた高耐候性圧延鋼材を使用し、板厚を薄くすることによって軽量化を図っている。

表1 南港ポートタウン線新交通システムの諸元 車両の寸法と、電気方式、運転方式を列記した。

項 目	諸 元
車 両 (長さ)	7.6m
" (幅)	2.3m
" (高さ)	3.15m
定 員 (1両)	75人
車両編成(1列車)	4両(将来6両)
分岐方式	可動案内板方式
電気方式	三相600V
制御方式	サイリスタレオナード方式
運転方式	ATOによる無人運転
業務管理	コンピュータによる運行電力、駅務管理
距 離	6.6km(8駅)

注：略語説明 ATO(Automatic Train Operation)

* 大阪市交通局 ** 株式会社新潟鉄工所 *** 日立製作所国分工場 **** 日立製作所日立研究所 ***** 日立製作所関西支店

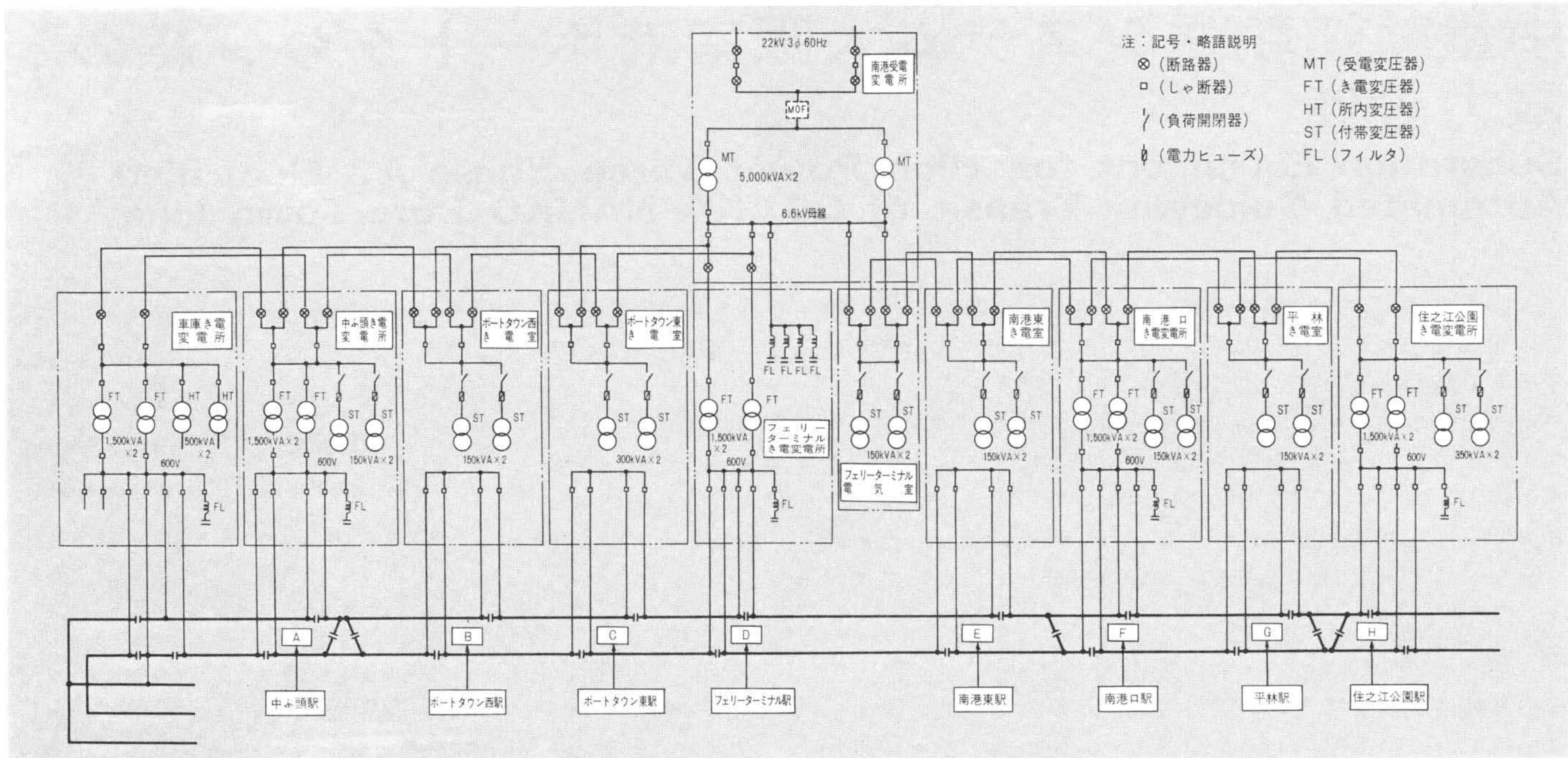


図2 南港ポートタウン線電力系統図 電力系統は受電変電所1箇所、き電変電所5箇所、き電室4箇所、電気室1箇所構成されている。

駅のき電変電所、き電室及び電気室へケーブル2回線で配電している。受電変電所6.6kV母線には、高調波対策として第5次450kVA、第7次600kVA、第11次450kVA、第13次300kVAのフィルタを設置し、買電への高調波流出を制限している。

4.2 き電変電所

1,500kVA×2バンク(1台は予備)の変圧器で6.6kVから600Vに降圧し、き電線しゃ断器を介してトロリ線に供給している。600V母線には力率改善用進相コンデンサを兼ねた250kVAの第5次高調波フィルタを設置している。

他に2台の付帯用変圧器が設けられ、信号通信電源、照明電源を供給する。

図3にき電変電所内部の一例を示す。

4.3 き電室、電気室

き電線しゃ断器と付帯変圧器などを設置したものをき電室と呼び、付帯変圧器だけを設置したものを電気室と呼んでいる。き電室のき電線しゃ断器は、現在は延長き電用としてだけに使用し、トロリ線の短絡、地絡故障時の停電区間の極小

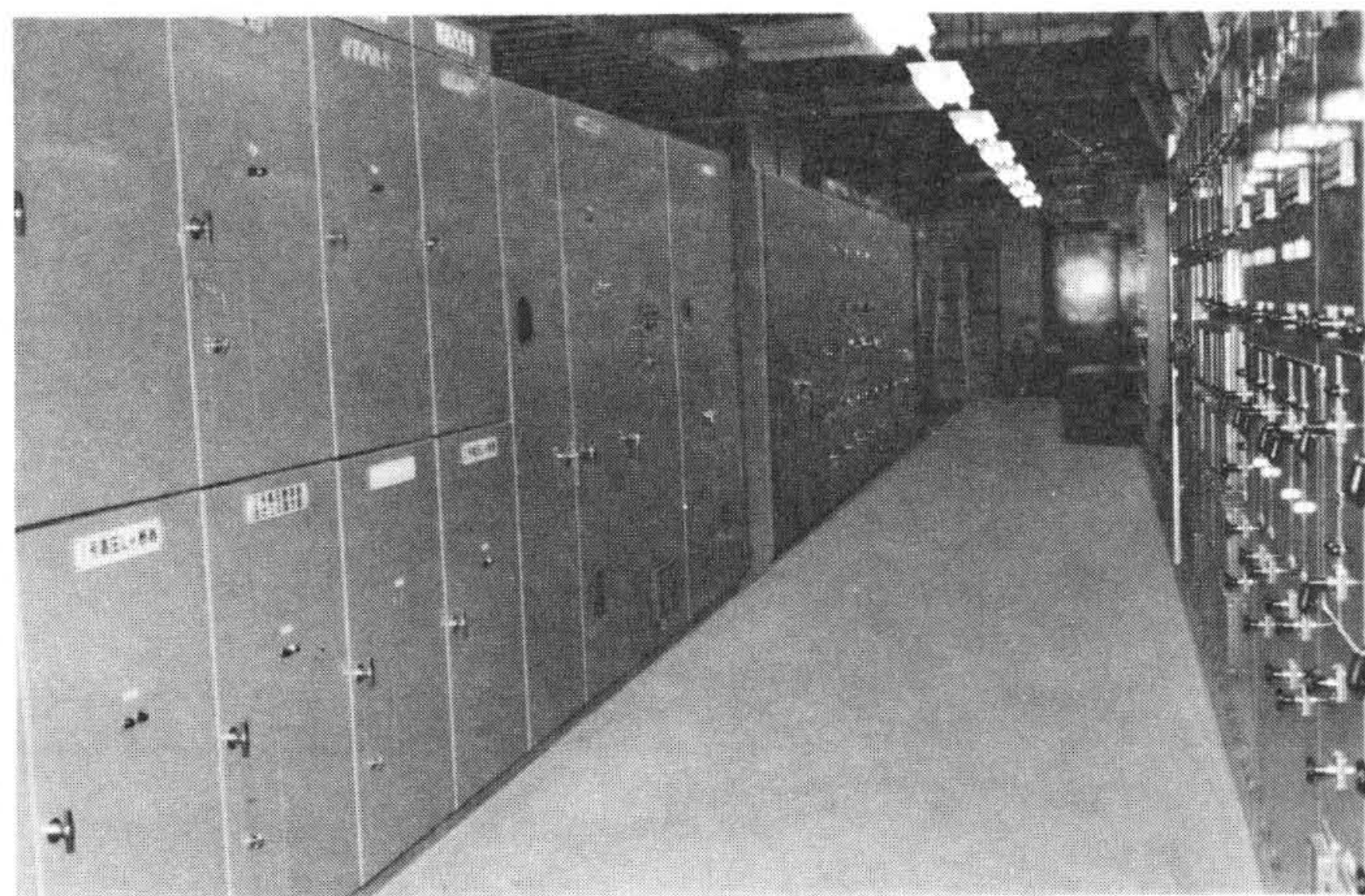


図3 中ふ頭き電変電所内部 高圧、低圧とも保安上安全性の高い全キュービクル方式としている。

化を図るための区分開閉器としているが、将来の列車運行密度の増加に際して、き電変圧器と一次しゃ断器、二次しゃ断器を付加することにより、き電変電所として運用することができるように計画されている。

4.4 遠方監視制御と自動運転

これらの電力設備は全部無人とし、車庫内に設けられた中央指令所からの専用制御回線を介して、サイクリック方式による遠方監視制御を行なっている。また、朝のき電開始、夜のき電停止、進相コンデンサの入切など、スケジュールに応じたしゃ断器の操作が自動的に行なわれるように、コンピュータ制御を行なっている。コンピュータは、本号別稿の「大阪市交通局向け南港ポートタウン線の管理システム」で紹介しているコンピュータと共用になっている。

4.5 電力設備の特徴

本電力設備の設計に当たっては、防災面、保全面から有利なオイルレス化を進め、変圧器は乾式自冷モールド形、しゃ断器は22kVはSF₆ガスしゃ断器を、6.6kVは真空しゃ断器を、600Vは気中しゃ断器をそれぞれ採用している。

き電回路の接地方式は、中性点高抵抗接地(10A接地)方式として地絡故障時の地絡電流を制限するとともに、高感度地絡方向リレーによる方向比較連動しゃ断方式により、的確な区間保護を行なっている。

5 電力シミュレーション

中量軌道輸送システムの電力設備は、前述したように受電電源系統、受電変圧器、き電変圧器、配電線、トロリ線、フィルタ設備及び走行状態によって、負荷電流、力率が変化し、また、高調波の発生量が変化するサイリスタレオナード形の制御器をもつ多数の車両を含んだ複雑な回路網を構成する。そこで、このような系を対象として電力、高調波を計算するシミュレーションプログラムを開発して、電力のシミュレーションを行なった。

図4に、シミュレーションによる電力設備設計のフローチャートを示す。

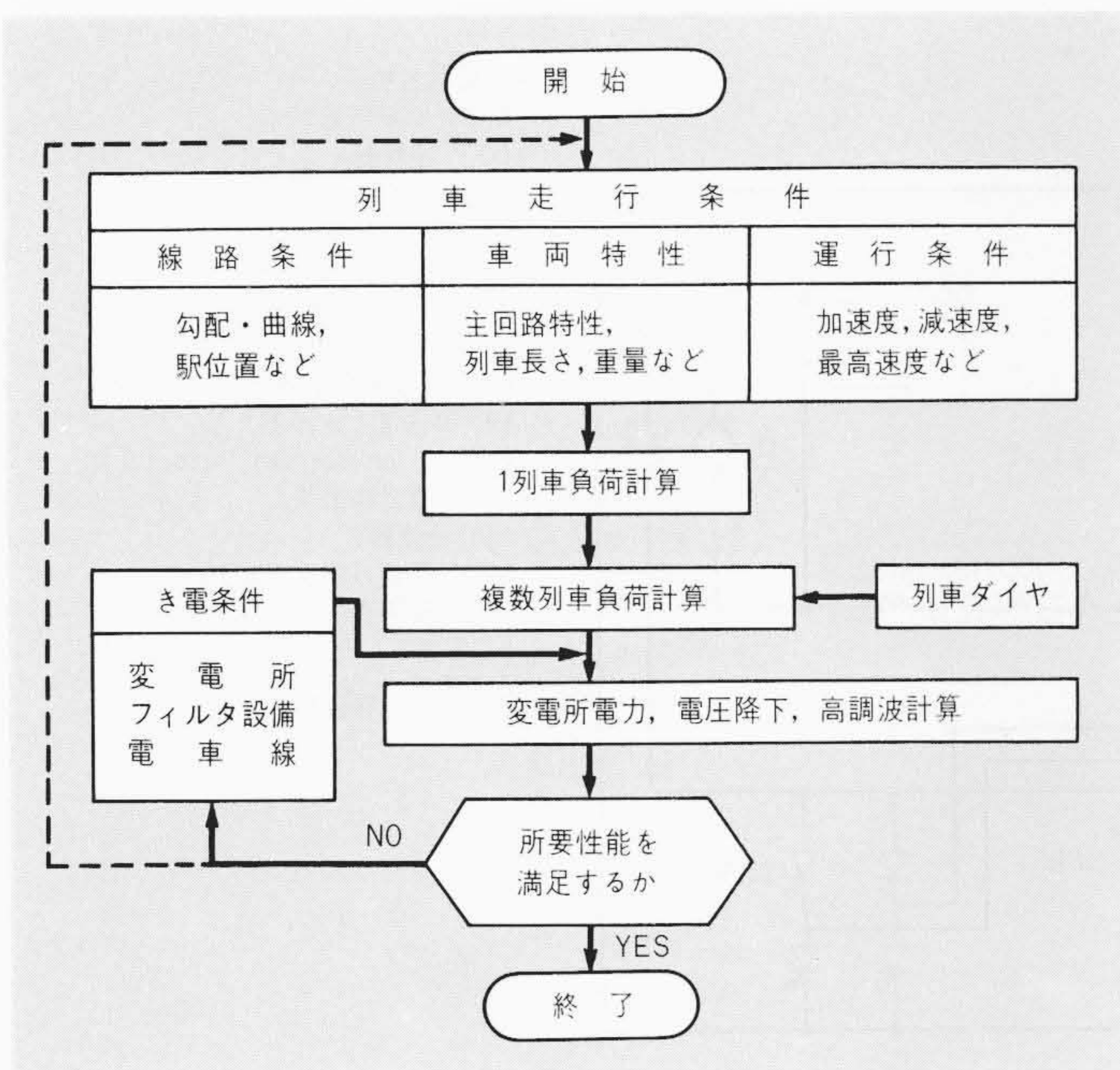


図4 シミュレーションによる電力設備の設計 列車走行条件を含めたシステムの設計が可能である。

まず、下記の条件を与え、基準となる上り線、下り線1列車のモデルランカーブ、有効電力、無効電力、皮相電力及び第3次から第25次までの奇数次高調波を求める。

- (1) 駅間距離、曲線、勾配、制限速度などの線路条件
- (2) 車両重量、制御器特性などの車両特性
- (3) 加速度、減速度、最高速度などの運転条件

次に列車ダイヤに従って、複数の列車の位置を線路上に割り付けるとともに、前述のランカーブにより時刻に対する列車位置を変化させ、これら走行状態の異なる複数の列車の負荷電流をベクトルで与える。そして、変電所の容量や配置、フィルタ設備の次数や容量、電車線インピーダンスなどのき電条件を与え、変電所電力、高調波電流、電車線電圧降下などを求める。力率などの計算結果が目標値を満足できない場合には、き電条件や更には列車走行条件に改善を加え、再計算し最適化する。シミュレーションプログラムは、変圧器を

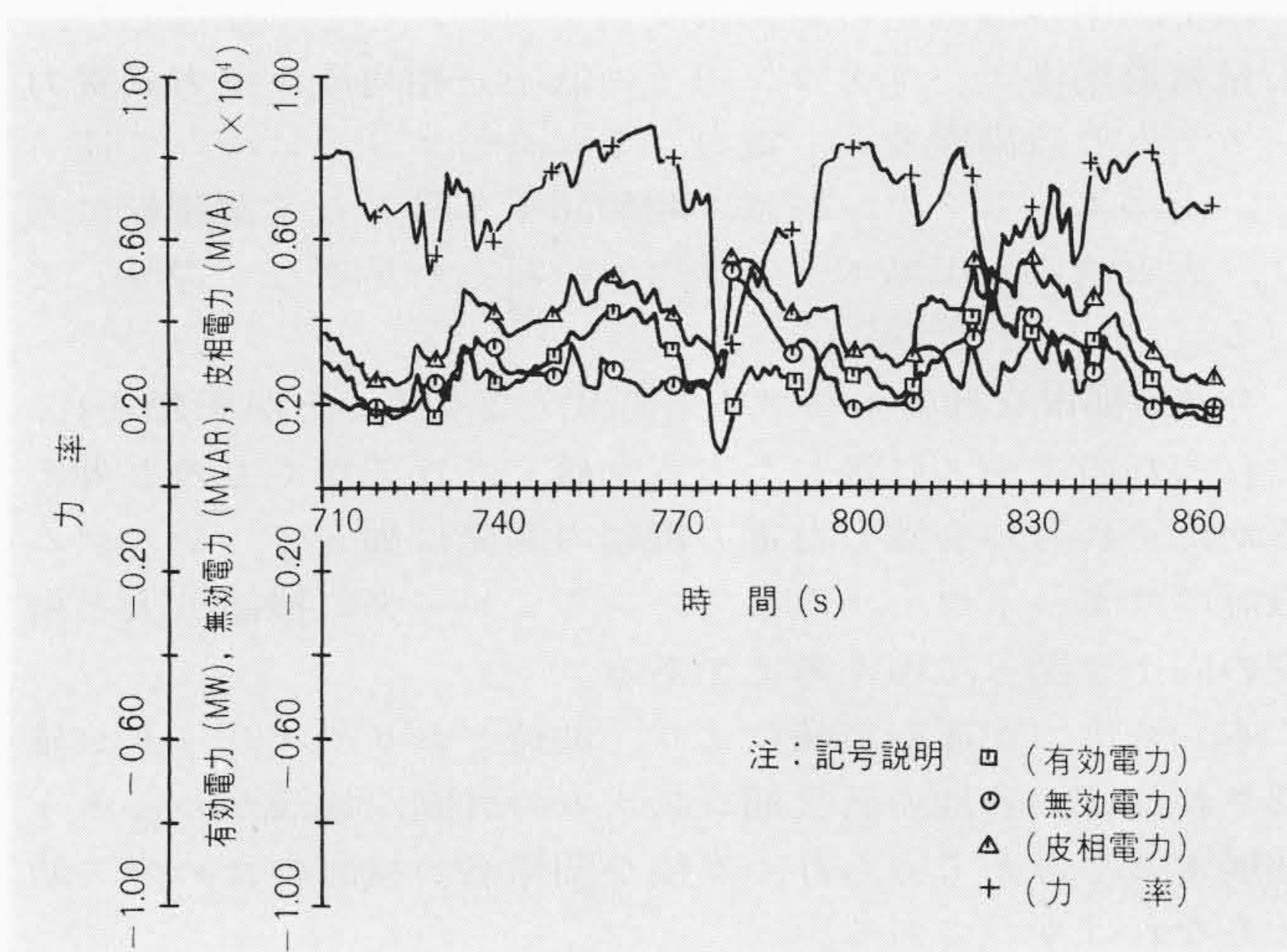


図5 電力シミュレーションの例 運転間隔135秒の平衡ダイヤで走行した場合の受電変電所電力、力率を示す。

含む三相のき電システムを単位法で表現して扱い、簡単化している。

図5に、南港ポートタウン線で、列車が運転間隔135秒で走行した場合の受電変電所電力の計算例を示す。このようなシミュレーションにより、受電変電所、各き電変電所の電力、力率が容易に把握される。

このき電システムでは、サイリスタ制御を行なう車両の負荷特性から、そのままでは力率がかなり低くなることが分かる。

6 電圧降下シミュレーション

低圧交流き電方式では、き電線、トロリ線のリアクタンス分による電圧降下も重要な検討項目の一つである。本シミュレータの開発は、5章で説明した電力、無効電力、皮相電力、力率などの通流電流量の解析に加えて、モデル化された給電回路網の中で時々刻々変化する複数の負荷点位置と、負荷電流の大きさ、力率の変化によってパンタグラフ電圧がどのように変化するかの解析も可能とした。

これにより、運行中の車両のパンタグラフ電圧がどのような状態でも車両の許容する最低電圧以上にあるかどうかを確認することができ、線路インピーダンスの影響の方向が相反する短絡電流計算と合わせて設備定数の最適化を図る。

7 高調波電流対策

本中量軌道システムの車両では、図6に示す制御装置主回路構成から、(1)電機子電流制御用の三相全波ブリッジサイリスタ位相制御回路から発生する $(6n \pm 1)$ 次 $(n=1, 2, \dots)$ の高調波電流、(2)界磁電流制御用の単相全波ブリッジサイリスタ位相制御回路から発生する $(2n \pm 1)$ 次の高調波電流が存在する。

この高調波電流は、き電システムを通して受電点から電力会社の電源系統へ分流するが、この値には第5次高調波～第25次高調波について表2に示す制限値が適用されることになった。

例えば、第5次高調波について考えると、高調波成分を基本波の $\frac{1}{n}$ 、全列車の高調波はスカラー和になると仮定すれば、受電電圧 E_R が22kVなので、受電電力を P_s (kVA)と置くと、次式が得られる。

$$I_{nL} \leq \frac{P_s}{E_R \sqrt{3}} \cdot \frac{1}{n}$$

ここに I_{nL} = 第 n 次高調波電流の制限値

上式から、受電電力が約2MVA以上では高調波が制限値を満足できないことになる。

実際のき電システムでは列車の走行状態が異なるので、全列車の高調波はベクトル和で求める必要がある。また、車両が発生する高調波成分も、電流波形の重なり角、脈流率を考慮する必要がある。そこでこれらを考慮して、前章で述べたような、電力と同時に高調波を計算するシミュレーションプログラムを開発し、き電システム内の高調波を把握している。

高調波の低減方法としては、車両が比較的低力率であるので、この改善を同時に行なうよう、3章で述べたように、進相コンデンサを兼ねた高調波フィルタを用いる方法が適している。このため、き電変圧器の二次側で最も成分の大きい第5次高調波を分流し、かつ力率を改善するため第5次の高調波フィルタを設けた。また、き電システム全体の平均的高調波を分流するため、第5次、第7次、第11次及び第13次の高調波フィルタを受電変圧器の二次側に設けた。

図7にこれらの条件を考慮して、シミュレーションを行なった場合の受電電流高調波の計算例を示す。

図8に本線試験でのフィルタ電流を除く負荷電流と、受電

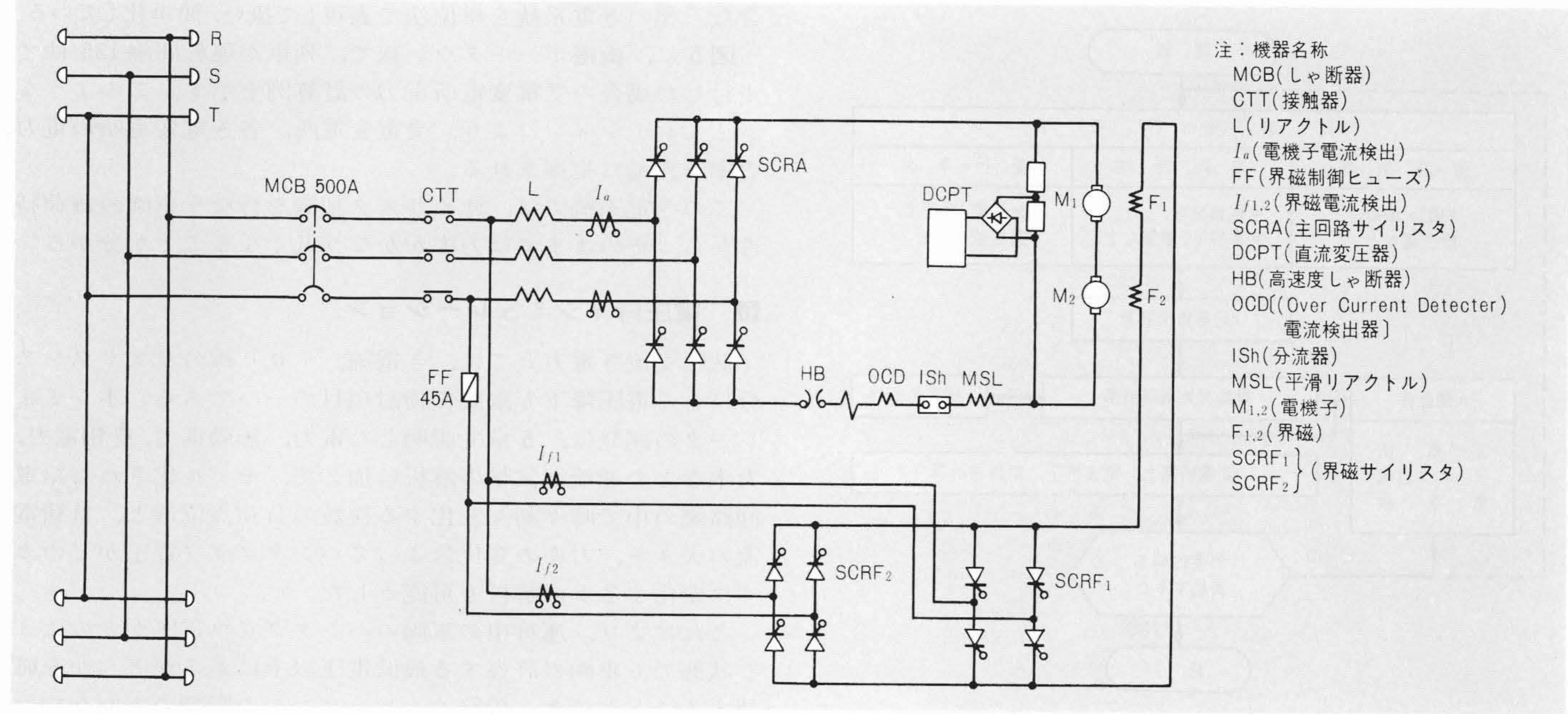


図6 制御装置主回路接続図 SCRF₁, SCRF₂により、界磁電流の極性を変えて電力回生を可能としている。

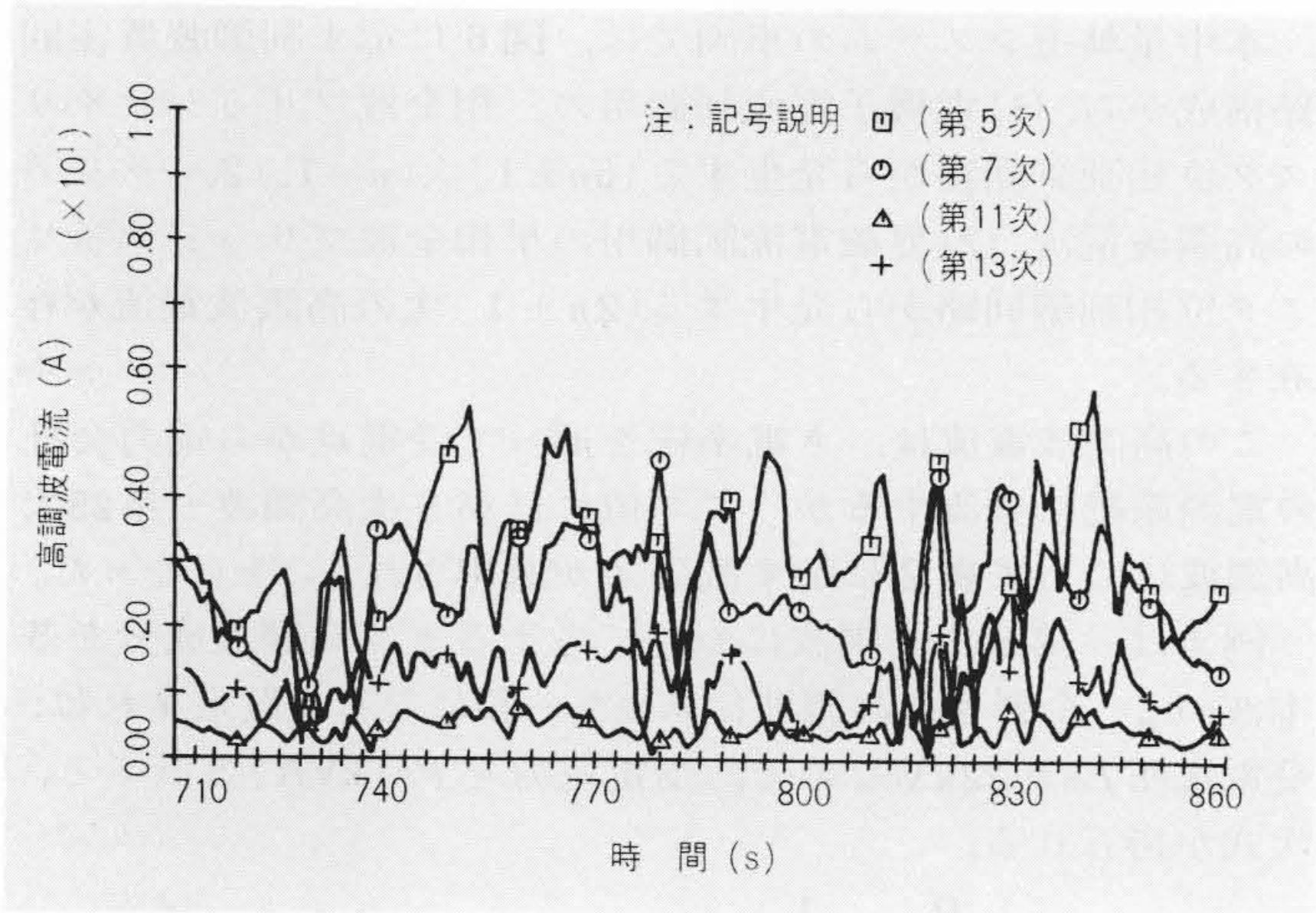


図7 高調波電流シミュレーションの例 図6と同一条件での第5次～第13次の高調波電流シミュレーション結果を示す。

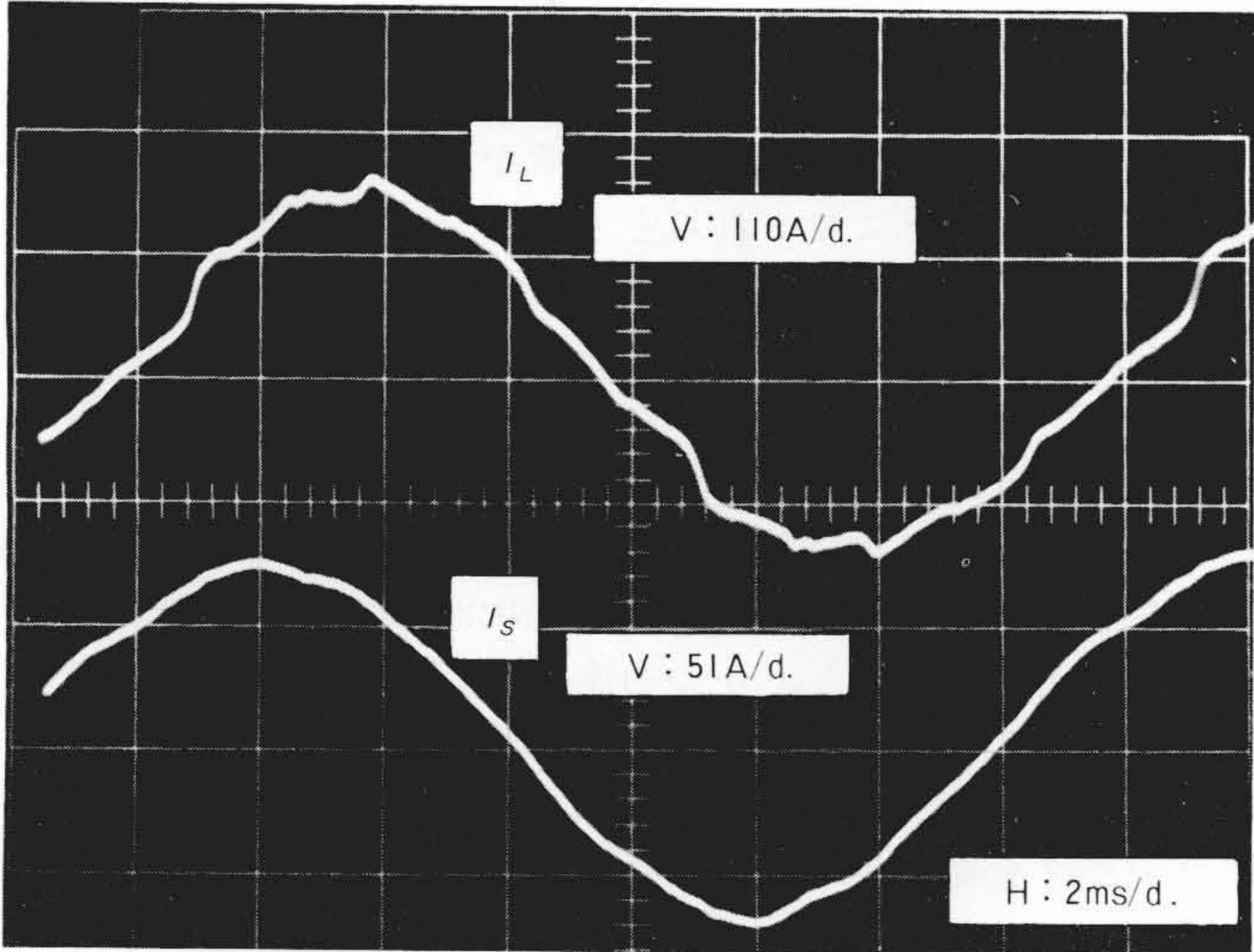


図8 負荷電流波形 I_L と受電電流波形 I_S 高調波フィルタにより、受電電流の高調波成分が低減する一例を示す。

表2 高調波電流の許容値 受電電流の高調波は、受電回路でこの表の値以下にする必要がある。

高調波次数	高調波電流	高調波次数	高調波電流
第5次(300Hz)	10.6A	第17次(1,020Hz)	1.8A
第7次(420Hz)	5.0A	第19次(1,140Hz)	1.7A
第11次(660Hz)	2.6A	第23次(1,380Hz)	1.8A
第13次(780Hz)	2.2A	第25次(1,500Hz)	1.9A

電流の波形を示す。両者を比較すると、受電電流では負荷電流の高調波成分が低減していることが分かる。また、現地試験の結果、高調波電流の発生量は列車の運転間隔に応じた同期性がみられたが、最大値をとっても表2に示した許容値以下を十分満足した。

8 結 言

以上、中規模輸送の新都市交通システムとして登場した、中量軌道南港ポートタウン線での低圧三相交流き電方式電力システムの設備概要と、電力シミュレーションについて述べた。南港ポートタウン線は、昭和56年3月から営業運転に入り、大阪湾の人工島ポートタウンの新しい足として寄与している。

今後、都市交通のニーズも多様化してゆくことが予想され、それぞれのニーズに適した方式が確立されてゆくものと考えられるが、それらに合致した電力機器の開発に加えて、システム設計のサポートツールとしてのシミュレータの機能拡大と精度の向上を図ってゆく考えである。

本システムが運転実績により、期待どおりのメリットが確認されれば、各地の新交通システムの計画、建設がいつそう進展するものと考えられ、本稿が関係者の検討のための一助ともなれば幸いである。

終わりに、本電力システム開発に当たり、御指導をいただいた関係各位に対し心からお礼を申しあげる次第である。