

電力回生インバータ付き鉄道変電システム

Thyristor Inverter-recuperative System for Traction Substation

直流式電気鉄道の回生電車の発生した回生電力を、変電所で交流電力に変換して、一般負荷に供給するための電力回生インバータ設備の導入に当たって、機器仕様をコンピュータシミュレーションにより検討し、実測結果との検証を行なった。

その結果、直流電鉄変電所の回生インバータの機器仕様の決定には、その電鉄システム固有の「列車の運転間隔と変電所の回生電力との相関関係」を調べ、二乗平均から連続定格を、回生失効をどこまでカバーするかで過負荷定格を決定できることが分かった。

また、電力シミュレーションと高調波解析の結果は、実測値とほぼ一致し、定量的設計に使用可能なことを確認した。

大鋸英五* Eigo Ôga
池田正人* Masahito Ikeda
田村 薫** Kaoru Tamura
桑原 誠*** Makoto Kuwabara

1 緒 言

近年、直流式電気鉄道で回生電車の発生した回生電力を有効に利用するとともに、回生制動システムを安定に作動させるため、回生により返還された直流電力を変電所で交流電力に変換し、一般負荷に供給することを目的とした電力回生インバータ設備¹⁾が増えつつある。

日立製作所では、名古屋市交通局浄心変電所²⁾及び西武鉄道株式会社新交通システム山口線の中峯変電所に電力回生設備をもつ変電システムを納入している。

本論文では、電力回生インバータ設備の導入に当たって検討した機器仕様、制御方式及び運転結果について、名古屋市交通局浄心変電所向け電力回生設備を中心に述べる。

2 路線概要

名古屋市地下鉄鶴舞線は、庄内緑地公園駅から赤池駅までの19.15kmについて運転間隔4～11分で運転されている。変電所は浄心変電所、前津変電所、御器所変電所及び天白変電

所の4箇所で、電力回生インバータ設備は浄心変電所に設置された。

3 電力回生設備

図1に浄心変電所構成図を示す。三相交流33kVで受電し、33kV母線から整流器設備を介して直流1,500V電車線に供給して、33kV/6.6kV高配変圧器により6.6kV母線へ高圧一般負荷(以下、高配負荷と略す。)用電力を供給している。

電力回生設備は6.6kV母線-直流1,500V線母線に接続され、回生により返還された直流電力を交流電力に変換して高配負荷に供給する。

4 機器仕様の決定

電力回生設備の機器仕様を決定するためには、

- (1) 電力回生設備の容量
- (2) 高調波フィルタ³⁾

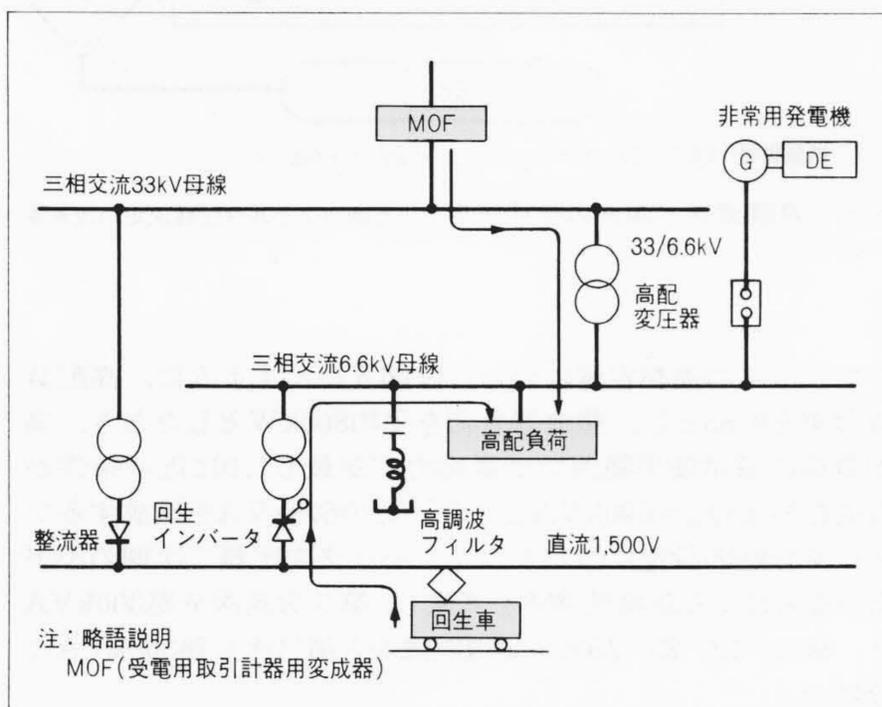


図1 名古屋市交通局浄心変電所構成図 名古屋市交通局浄心変電所の概略構成図を示す。

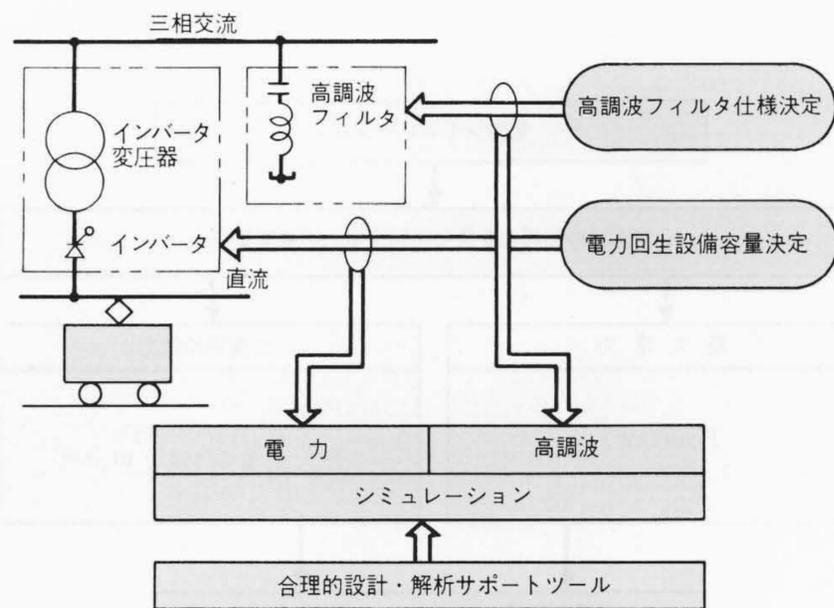


図2 機器仕様の決定 電鉄電力回生インバータ設備の機器仕様決定の流れを示す。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所機電事業本部

について、図2に示すフローに従って合理的に解析する必要がある。そこで設計サポートツールとして電子計算機による電力、高調波シミュレーションを適用した。

4.1 電力回生設備容量

電力回生設備容量の決定に当たっては、軌道輸送システム用電力シミュレータ“JUMPS”(Justified Models for Practical Specification)^{4)~6)}を用い電力シミュレーションを実施し、図3に示すフローに従って、列車の運転間隔と変電所を通過すべき回生電力との相関関係について検討した。その結果、列車運転間隔に対する変電所の二乗平均電力 P_{rms} と最大電力 P_{max} は図4に示す関係を得た。同図から列車運転間隔によって、変電所回生電力が異なることが分かる。

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{t_1}^{t_2} \{P(t)\}^2 dt} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(1)$$

- ここに $P(t)$: 時々刻々の電力(kW)
- T_s : 運転間隔(s)
- t_1 : 運転間隔の始めの時刻(s)
- t_2 : 運転間隔の終わりの時刻(s)

図4から電力回生設備の連続定格は車両運転間隔3~9分、6両編成(全回生車)でのダイヤをすべて満足する二乗平均電力から1,000kWとした。過負荷定格は運転間隔3~9分、4両編成(全回生車)でのダイヤを満足するが、運転間隔5~6分、6両編成での回生失効は一部認めるものとして5,000kWとした。5,000kW以上の回生は、インバータ制御装置により絞り込み制御を行ない回生失効するものとした。

この電力シミュレーションにより、変電所の回生率は運転間隔5分、4両編成で10.1%、運転間隔3分、6両編成で8.4%と推定した。

4.2 高調波フィルタの検討

図5に高調波フィルタの仕様決定フローを示す。高配負荷の力率改善、高調波の吸収の両面からフィルタ仕様を決める必要があり、電源系統、変電所諸条件及び発生する高調波のレベルからインピーダンスマップを作成し、“EMTP”(Electro-Magnetic Transients Program)⁷⁾による高調波解析を行ない、33kV受電端(図2でMOF部)と6.6kV母線の高調波電圧、電流を求め規定値を満足することを確認した。

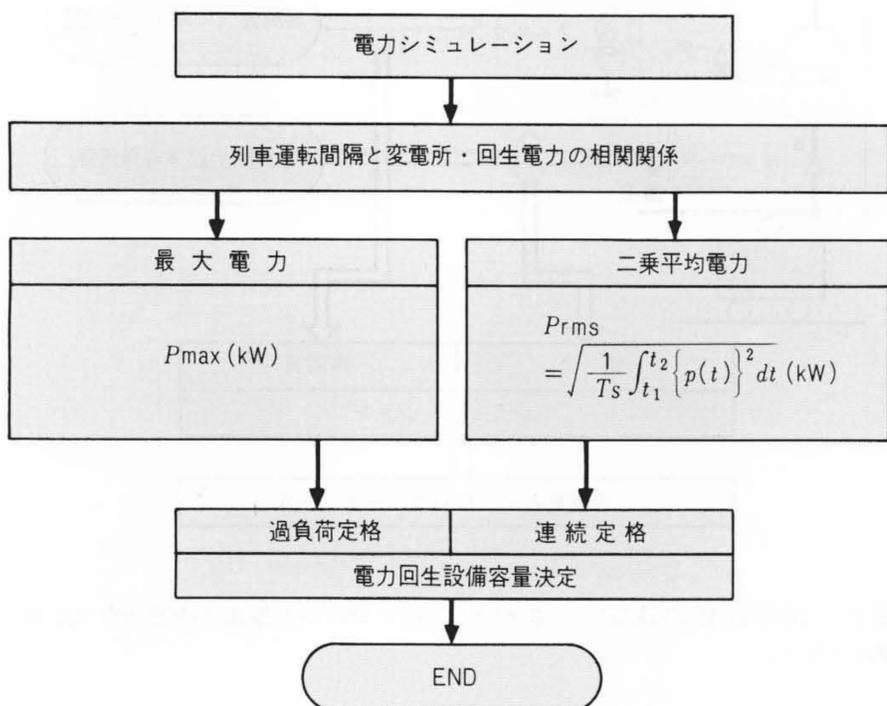


図3 電力回生設備容量の決定 電力回生インバータ設備容量決定の流れを示す。

記号	両数	回生列車数/全列車数
—●—	4	2/3
—×—	4	5/6
—△—	4	6/6
---●---	6	2/3
---△---	6	6/6

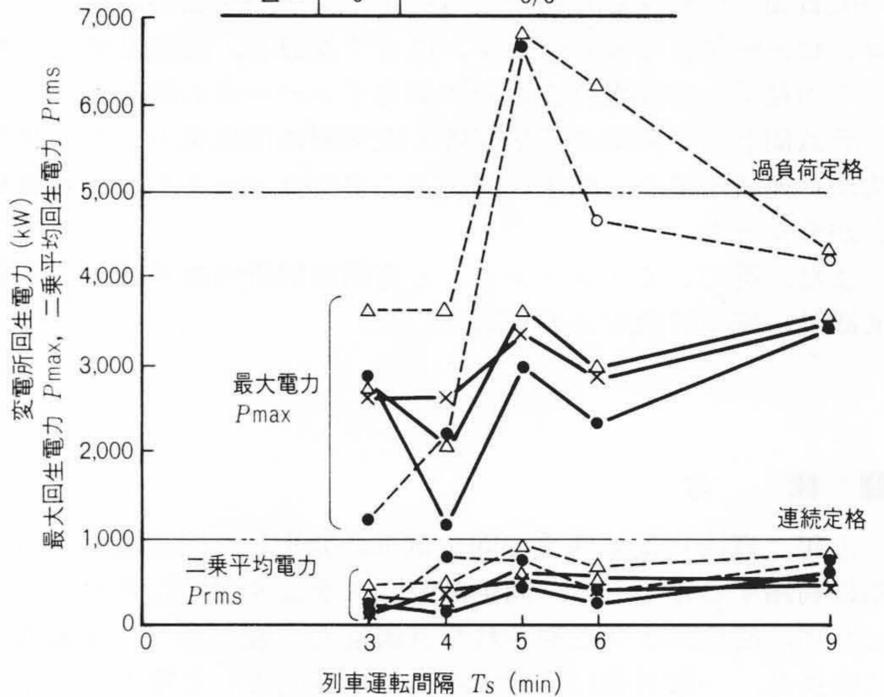
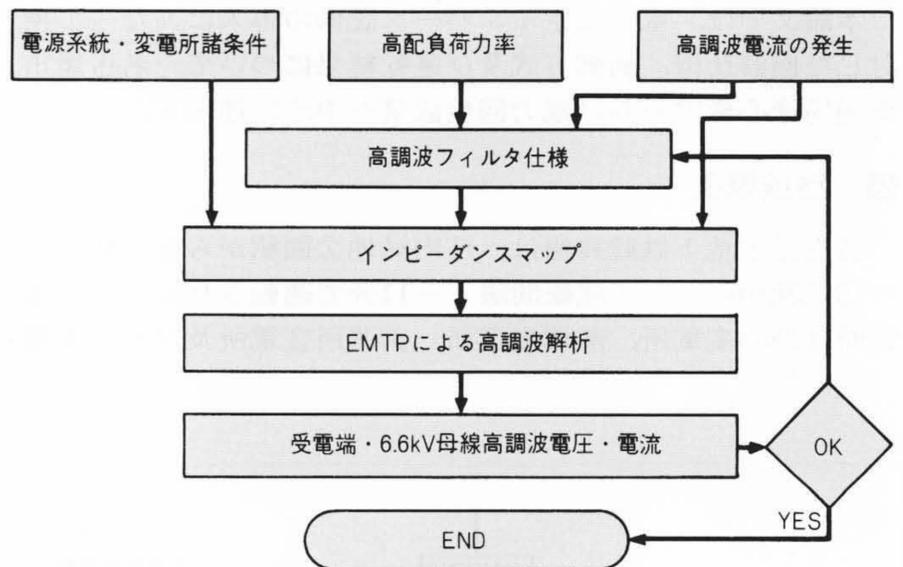


図4 列車運転間隔と変電所の回生電力 列車運転間隔と変電所回生電力の相関関係を示す。



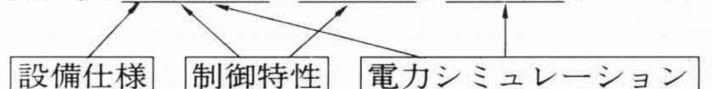
注：略語説明 EMTP(Electro-Magnetic Transients Program)

図5 高調波フィルタの仕様決定 高調波フィルタ仕様決定の流れを示す。

フィルタの進相容量については図6に示すように、高配負荷力率を0.85とし、整流器負荷を平均800kWとしたとき、高配負荷の通常使用範囲で受電端力率が最も1.0に近い条件から進相容量 $Q_{sc}=600kVA$ とした。この600kVAを構成するフィルタ分路の設定に当たり、インバータ変圧器二次側の不平衡分などによる非論理調波を考慮し、第5次高次分路300kVAと、第11, 13, 23, 25次の論理調波から第11次分路300kVAに分けた。

回生インバータ交流側高調波電流 $I_H(n)$ は、(2)式に示すように重なり角、制御角、負荷量の関数として決まる。

$$I_H(n) = f\{(\text{重なり角}), (\text{制御角}), (\text{負荷量})\} \dots\dots(2)$$



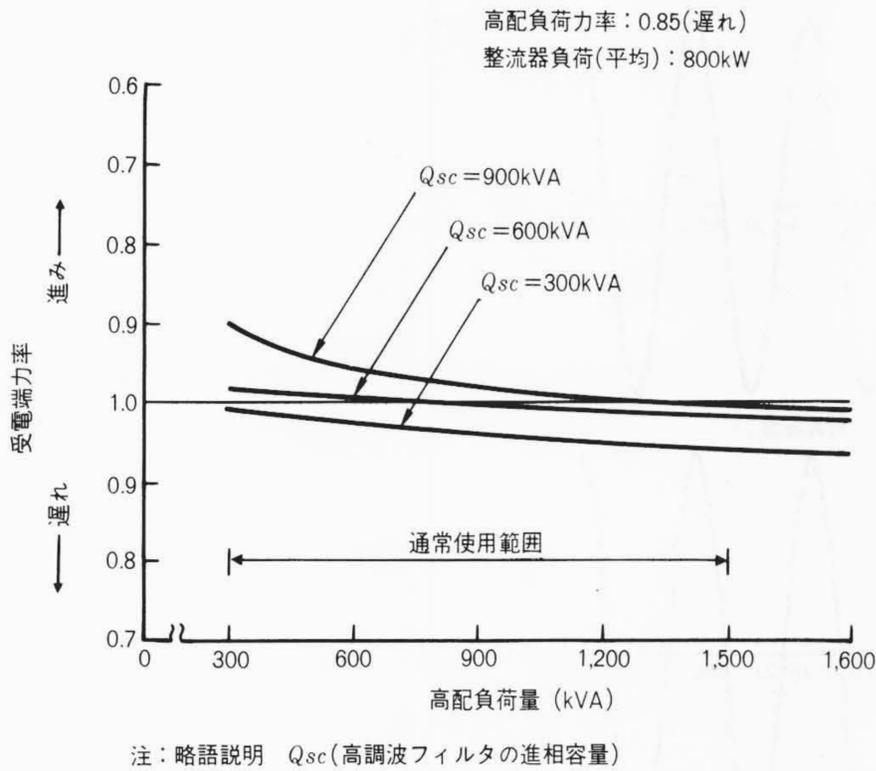


図6 高配荷と受電端力率 高調波フィルタ進相容量に伴う高配荷容量と受電端力率の関係を示す。

したがって設備仕様、制御特性、電力シミュレーションから重なり角を、制御特性から制御角を、電力シミュレーションから負荷量を求め、発生する高調波電流を求めた。

5 電力回生インバータの制御方式

インバータ制御領域を図7に示す三つの領域に分け、それぞれ領域特有の制御を行なう。

図7中の①は整流器設備からの力行負荷供給時又は無負荷時で一定の循環電流を流し、インバータ装置のアイドリングを行ない回生動作開始を速くするための循環電流制御である。

図7中の②の高効率回生制御は、回生電流 I_{di} が増加すればするほど直流側電圧値 V_d を下げて、より遠方からの回生をも可能にするものである。

図7中の③はインバータ装置の過負荷領域で直流側電圧 V_d を上げるように制御し、回生車両の回生失効を促し回生電流を絞り込む絞り込み制御である。

6 実測結果

最大電力 P_{max} での列車運転間隔と変電所の回生電力との相関関係は、図4に示す傾向を示した。数十秒のダイヤの変動により、傾向は変わらないが数値が変動する。回生率は電力シミュレーションで循環電流を含まない値として、運転間隔5分、4両編成で10.1%、運転間隔3分、6両編成を8.4%と推定したが、実測結果は1日を通して運転間隔が最小4分、最大15分と変化する運転ダイヤによるため、前記シミュレーション結果とは比較は困難であるが、終日の平均回生率は循環電流を含んだ値で16.7%、含まない値で12.5%であった。

図8に受電端の高調波を示す。(a)は電圧ひずみ率、(b)は高調波電流で、○印、×印、△印がそれぞれ回生インバータの計算値、実測値及び整流器からの高調波を示す。これから回生インバータの高調波は、整流器からのそれと同等以下であることが分かる。図9に電圧波形を示す。

図10に各制御領域の特性を確認した制御結果の一部を示した。(c)の絞り込み制御は、制御開始電流整定を3,000Aから1,000Aに下げて実験した。(d)は循環電流を流さないときの制

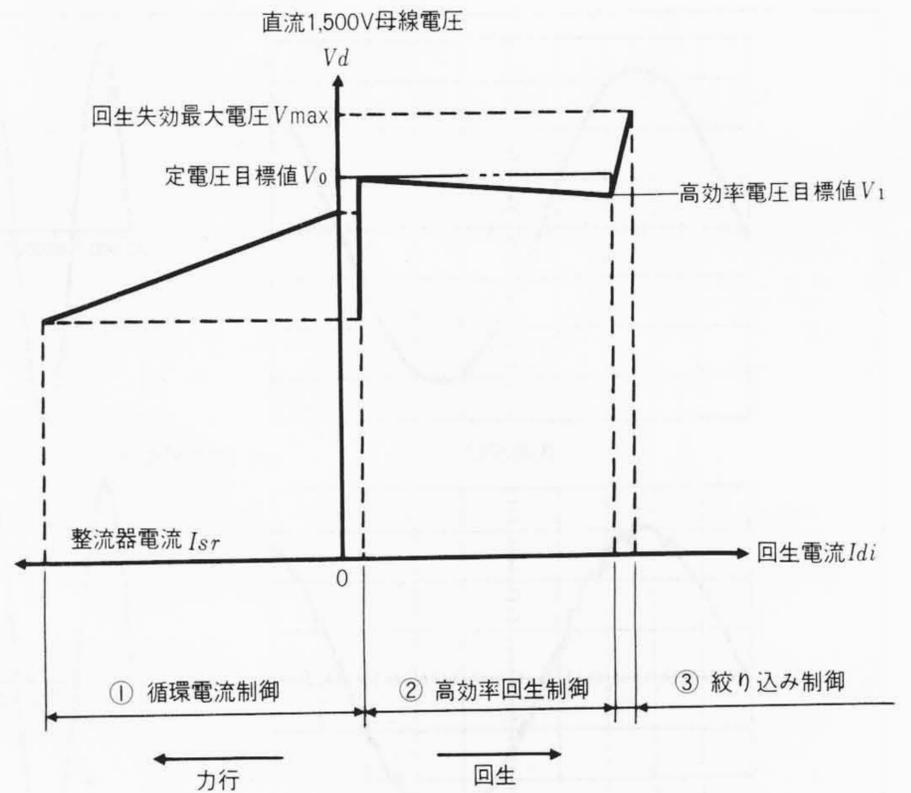


図7 インバータ制御領域説明図 インバータ制御を①循環電流制御、②高効率回生制御、③絞り込み制御の領域に分けて行なう。

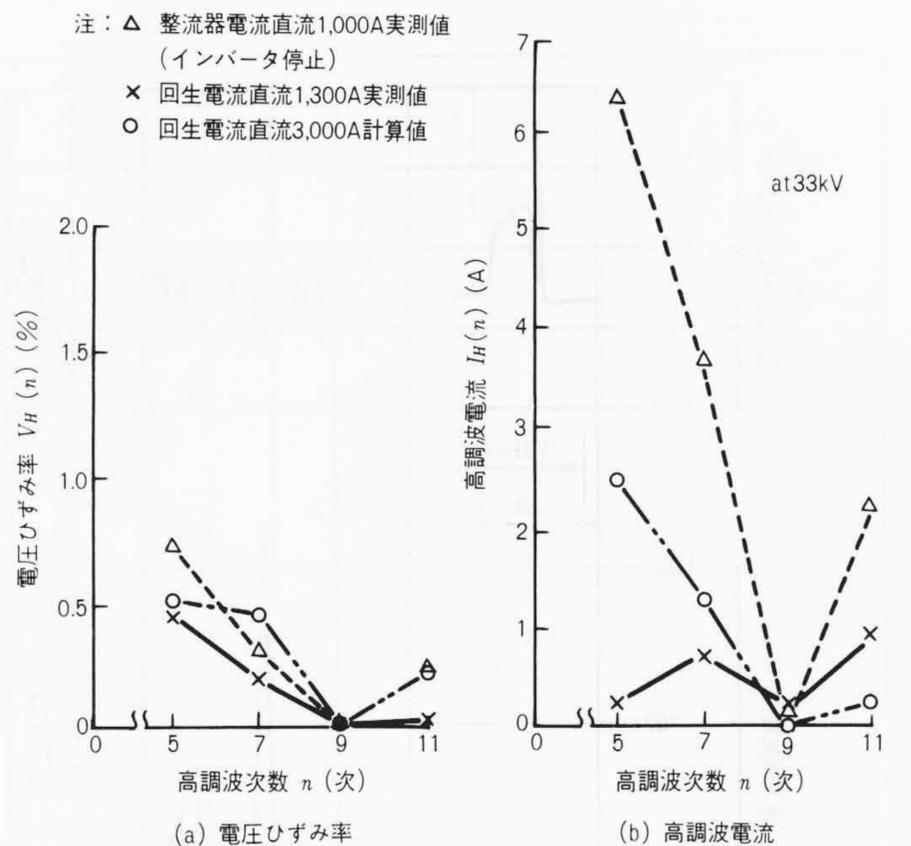


図8 受電端の高調波 受電端の高調波電圧ひずみ率と高調波電流を示す。

御結果で、回生初期の電圧が高くなることが分かる。通常は循環電流を流して運転中である。

7 結 言

直流電鉄変電所の電力回生インバータの仕様決定には、そのシステム固有の「列車運転間隔と変電所の回生電力との相関関係」を調べ、二乗平均から連続定格を、投資効果の面から回生失効をどこまでカバーするかで過負荷定格を決定できる。また詳細なデータは省略したが、測定した実測値は電力シミュレーション及び高調波解析の結果とほぼ一致しており、定量的設計に使用可能であることを確認した。インバータの制御方式で過負荷領域の絞り込みは、始・終電車、ダイヤの

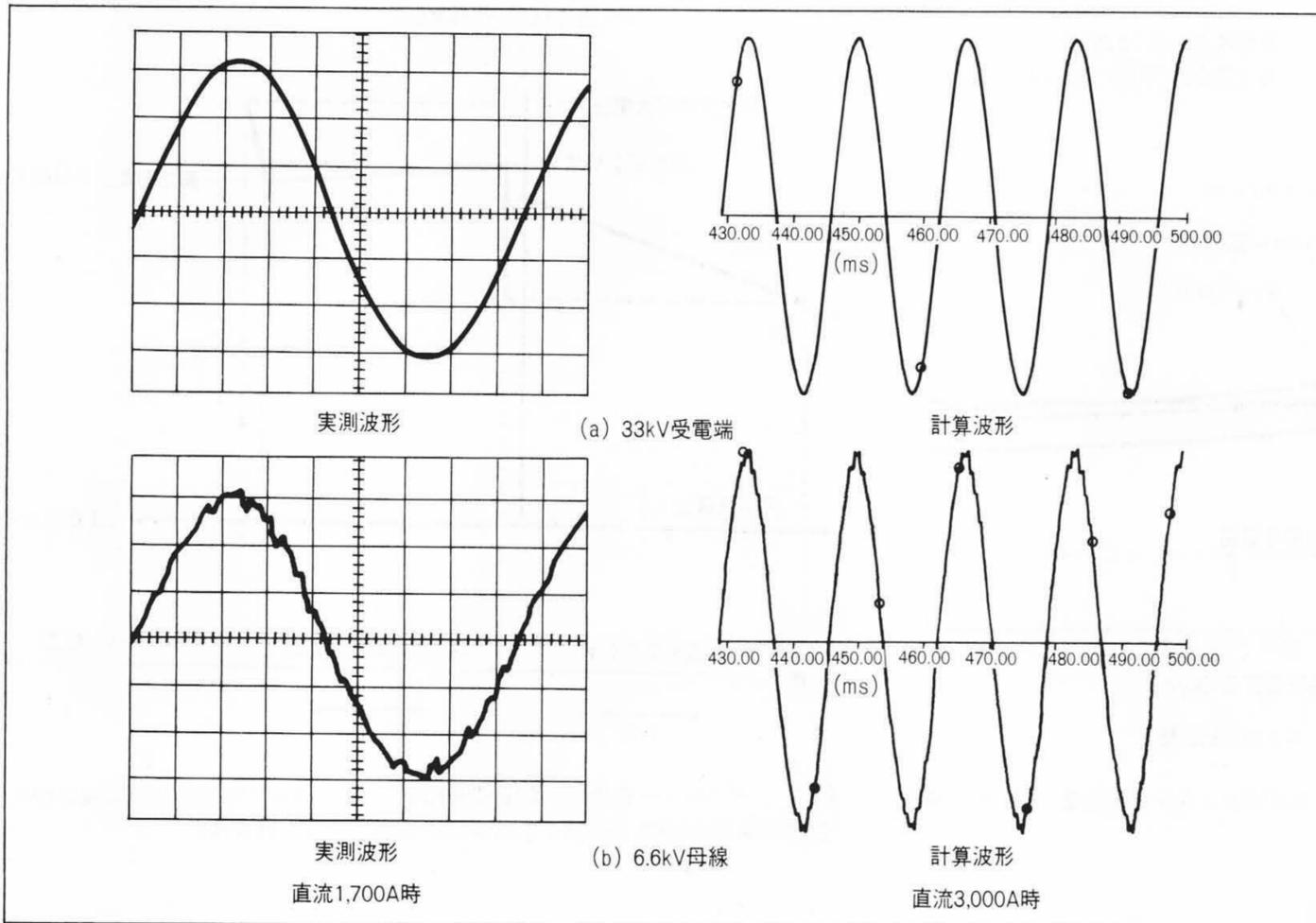


図9 電圧波形 33kV受電端と6.6kV母線での電圧の計算波形と実測波形を示す。

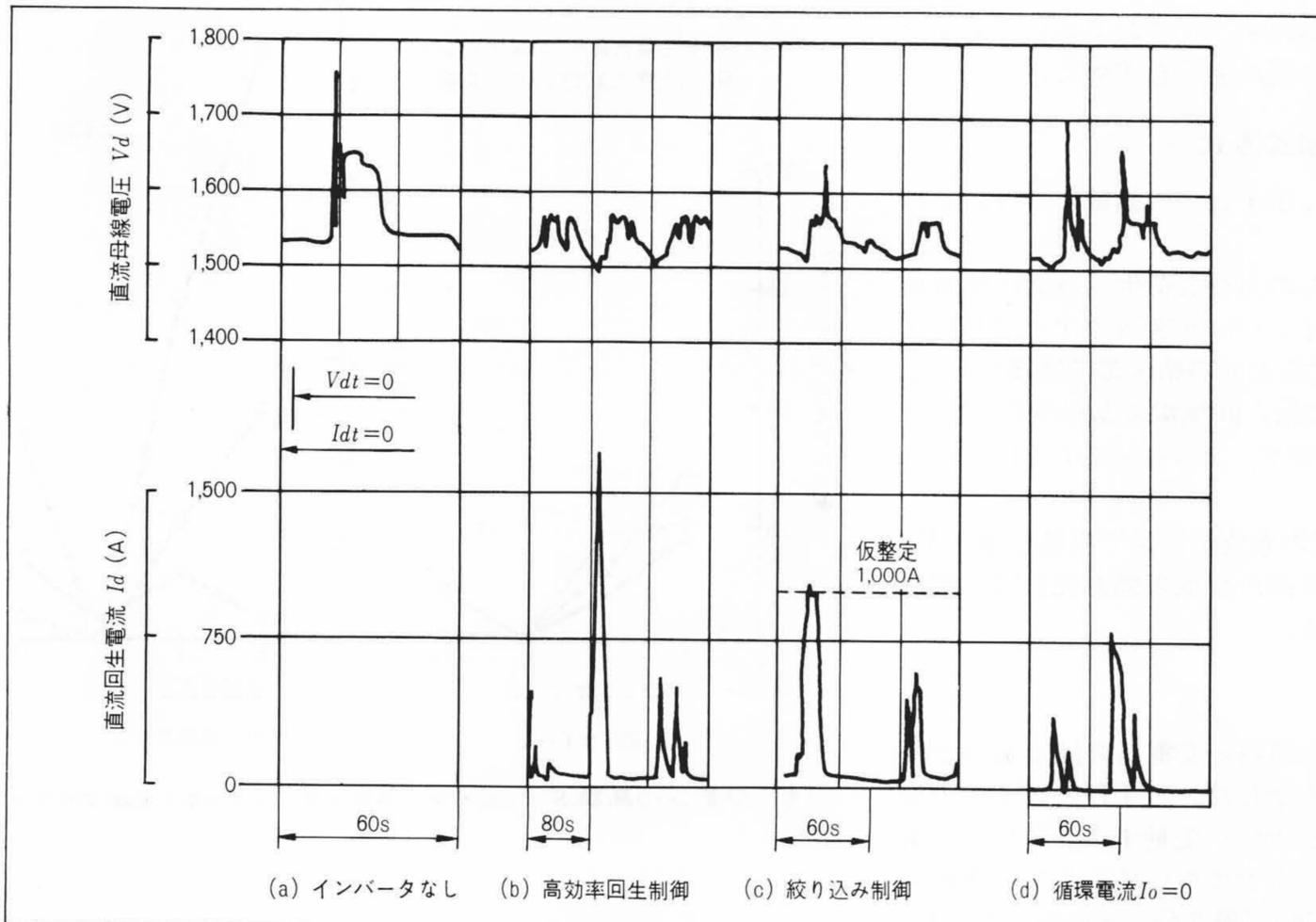


図10 回生インバータの制御特性(実測値) 直流母線電圧と回生電流での回生インバータの制御特性の実測値を示す。

変動による過大回生電力に対し有効に制御が行なえることを確認した。

終わりに、電力回生インバータ設備の導入に当たり、御協力をいただいた名古屋市交通局の今尾和剛氏をはじめ関係各位に対し、心からお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 関根, 外: 輸送交通管制, 電気書院(昭58)
- 2) 池田, 外: 名古屋市交通局浄心変電所の電力回生設備, 第21回鉄道サイバネ, No.519(昭58)

- 3) 配電線高調波対策専門委員会: 配電系統の高調波障害防止対策, 電気協同研究会, 第37巻, 第3号(昭56-10)
- 4) 宮本, 外: 輸送におけるシミュレーション技術, 日立評論, 64, 9, 651~656(昭57-9)
- 5) 宮本, 外: 軌道輸送システム用計画サポートシステム, TRANSPLAN, 日立評論, 60, 10, 751~756(昭54-10)
- 6) 安信, 外: 軌道輸送システム用電力シミュレータ, 電気学会, 情報処理研究会, IP-79-55, 10(昭53)
- 7) 雨谷: 汎用過渡現象解析プログラムEMTP, 電気学会雑誌, Vol.102, No. 6, 23(昭57)