

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	自励式半導体電力変換装置による電力系統電圧安定化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	江口直也
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3630号, 授与年月日:2002年10月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3630号, Conferred date:2002/10/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

自励式半導体電力変換装置による
電力系統電圧安定化に関する研究

2003年 1月

江口直也

目 次

第1章 序論	11
1. 1 研究の背景	11
1. 2 研究の目的	16
1. 3 論文の構成	19
第2章 電力系統の電圧に関する諸問題と対策技術	21
2. 1 まえがき	21
2. 2 電力系統の電圧に関する諸問題	21
2. 2. 1 電圧変動	
2. 2. 2 電圧動揺（短周期電圧変動）	
2. 2. 3 三相不平衡	
2. 2. 4 その他	
2. 2. 5 電圧問題のまとめ	
2. 3 系統電圧の諸問題に対する現状の対策	27
2. 4 現状の電圧補償・改善方式の特徴	29
2. 4. 1 調相設備による電圧維持対策の特徴	
2. 4. 2 直列コンデンサによる電圧維持対策の特徴	
2. 5 新しい系統電圧補償・改善装置	35
2. 5. 1 従来技術における問題点	
2. 5. 2 新しい電圧補償装置	
2. 6 まとめ	42
第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性	43
3. 1 まえがき	43
3. 2 下位側負荷に起因する電圧変動補償	43
3. 2. 1 解析モデル	
3. 2. 2 直列補償特性	
3. 2. 3 並列補償特性	
3. 3 上位側負荷に起因する電圧変動補償	48
3. 3. 1 解析モデル	
3. 3. 2 直列補償特性	
3. 3. 3 並列補償特性	
3. 4 下位側不平衡負荷に起因する3相不平衡電圧補償	54
3. 4. 1 解析モデル	
3. 4. 2 直列補償特性	
3. 4. 3 並列補償特性	
3. 5 考察	63

3. 5. 1	電圧補償特性の比較	
3. 5. 2	装置所要容量	
3. 5. 3	適正設置個所	
3. 6	まとめ	73
第4章	系統電圧の並列形補償器による安定化	74
4. 1	まえがき	74
4. 2	他励式SVCと自励式SVCの比較	74
4. 3	不平衡補償機能の開発	84
4. 3. 1	装置の概要	
4. 3. 2	制御	
4. 3. 3	試験結果	
4. 3. 4	応用	
4. 4	電圧動揺補償機能（フリッカ補償機能）の開発	101
4. 4. 1	装置の概要	
4. 4. 2	制御	
4. 4. 3	実験	
4. 4. 4	応用	
4. 5	まとめ	116
第5章	系統電圧の直列形補償器による安定化	117
5. 1	まえがき	117
5. 2	直列形補償器の基本構成と機能	117
5. 2. 1	基本構成	
5. 2. 2	機能	
5. 3	可変リアクタンス装置の開発	119
5. 3. 1	基本構成と動作原理	
5. 3. 2	主回路構成	
5. 3. 3	制御	
5. 3. 4	保護	
5. 3. 5	シミュレーション	
5. 4. 6	実験	
5. 4	瞬時電圧補償装置の開発	140
5. 4. 1	基本構成と動作原理	
5. 4. 2	制御	
5. 4. 3	シミュレーション	
5. 4. 4	実験	
5. 5	考察	156
5. 6	まとめ	157

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化	158
6.1 まえがき	158
6.2 基本構成と動作原理	158
6.3 装置容量	161
6.4 制御	164
6.5 シミュレーション	166
6.5.1 シミュレーションモデル	
6.5.2 電圧補償特性	
6.5.3 三相不平衡電圧補償特性	
6.5.4 過渡特性	
6.6 実験	168
6.6.1 実験装置	
6.6.2 実験結果	
6.6.3 考察	
6.7 フィージビリティースタディー	180
6.7.1 設置系統条件	
6.7.2 比較検討	
6.7.3 フィージビリティースタディーの考察	
6.8 まとめ	190
第7章 結論	191

参考文献

謝辞

図表目次

第1章

- 図 1. 1 電力需要の推移と予測⁽¹⁾
- 図 1. 2 電力系統をとりまく状況
- 図 1. 3 パワー半導体のデバイスマップ
- 図 1. 4 連系強化技術開発の実施体制
- 図 1. 5 自励式SVCの基本構成と等価回路
- 図 1. 6 他励式SVCの基本構成
- 図 1. 7 高速移相器の基本構成
- 図 1. 8 UPFCの基本構成

表 1. 1 国内外の大停電事故の事例

表 1. 2 連系強化技術開発の研究課題とスケジュール

第2章

- 図 2. 1 1電源1負荷1送電線の系統
- 図 2. 2 電圧，電流ベクトル図
- 図 2. 3 P－V曲線
- 図 2. 4 相設備を有した基本系統
- 図 2. 5 電力用コンデンサにより電圧補償を行ったときのP－Vカーブ
- 図 2. 6 調相用コンデンサによる電圧補償の様子
- 図 2. 7 不安定となる負荷特性
- 図 2. 8 電調相設備量をパラメータとしたP－Vカーブ
- 図 2. 9 直列コンデンサを有する系統
- 図 2. 10 直列コンデンサにより補償したときのP－V特性曲線
- 図 2. 11 並列形補償器
- 図 2. 12 能動的並列形電圧補償装置のモデル
- 図 2. 13 能動的並列形補償装置の出力特性ル
- 図 2. 14 RCの容量限界モデル
- 図 2. 15 直列形補償器

表 2. 1 系統電圧変動の様相と原因

表 2. 2 電気機器の電圧許容限界

表 2. 3 需要家電圧の基準

表 2. 4 系統電圧の運用基準

表	2. 5	巻線形誘導電動機の不平衡試験結果
表	2. 6	同期発電機の逆相電流の連続許容値
表	2. 7	不平衡負荷に対する規制
表	2. 8	電力系統における電圧問題のまとめ
表	2. 9	電圧問題への抑制対策
表	2. 10	従来の電圧補償方式の問題点
表	2. 11	並列形補償装置の特徴比較
表	2. 12	直列形補償装置の特徴比較

第3章

図	3. 1	下位側に遅れ負荷が存在する電力系統モデル
図	3. 2	下位側負荷に起因した電圧変動に対する直列補償モデル
図	3. 3	下位側負荷による電圧変動に対する直列補償特性
図	3. 4	下位側負荷に対する直列形補償器の装置容量
図	3. 5	下位側負荷に起因した電圧変動に対する並列補償モデル
図	3. 6	下位側負荷による電圧変動に対する並列補償特性
図	3. 7	下位側負荷に対する並列形補償器の装置容量
図	3. 8	上位側に遅れ負荷が存在する電力系統モデル
図	3. 9	系統上位側負荷に起因した電圧変動に対する直列補償モデル
図	3. 10	上位側負荷による電圧変動に対する直列補償特性
図	3. 11	上位側負荷に対する直列形補償器の容量
図	3. 12	系統上位側負荷に起因した電圧変動に対する並列補償モデル
図	3. 13	上位側負荷による電圧変動に対する並列補償特性
図	3. 14	上位側負荷に対する並列形補償器容量
図	3. 15	上位側負荷に対する並列補償モデル
図	3. 16	不平衡（単相）負荷存在する電力系統モデル
図	3. 17	三相不平衡電圧に対する直列補償モデル
図	3. 18	三相不平衡電圧に対する直列補償特性
図	3. 19	三相不平衡電圧に対する直列形補償器の装置容量
図	3. 20	直列補償時の負荷電圧と受電端電圧の不平衡率
図	3. 21	三相不平衡電圧に対する並列補償モデル
図	3. 22	三相不平衡電圧に対する並列補償特性
図	3. 23	三相不平衡電圧に対する並列形補償器の装置容量
図	3. 24	並列補償時の負荷電圧（＝受電端電圧）の不平衡率
図	3. 25	直列補償の基本構成
図	3. 26	並列補償の基本構成
図	3. 27	負荷力率を考慮した直列／並列補償モデル
図	3. 28	並列補償と直列補償のベクトル関係（系統電圧基準）

- 図 3. 2 9 並列補償と直列補償のベクトル関係 (負荷電圧基準)
- 図 3. 3 0 並列補償モデル
- 図 3. 3 1 直列補償モデル
- 図 3. 3 2 直列補償時の電圧・電流ベクトル図
- 図 3. 3 3 負荷力率を考慮した直列補償と並列補償の容量比
- 図 3. 3 4 直列形補償器の適用
- 図 3. 3 5 並列形補償器の適用

- 表 3. 1 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較 (下位側負荷)
- 表 3. 2 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較 (上位側負荷)
- 表 3. 3 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較 (三相不平衡補償)
- 表 3. 4 直列形補償と並列形補償の特徴と適用性

第4章

- 図 4. 1 他励式SVCの基本構成
- 図 4. 2 自励式SVCの基本構成
- 図 4. 3 単相R負荷に対する平衡化の基本回路
- 図 4. 4 他励式SVCによる単相負荷の平衡化
- 図 4. 5 不平衡補償に対する他励式SVCの各相電流と所要容量
- 図 4. 6 他励式SVCの動作波形
- 図 4. 7 自励式SVCのPWM波形と出力電圧
- 図 4. 8 定常波形の比較
- 図 4. 9 過渡応答波形 (設定急変) の比較
- 図 4. 1 0 主回路構成
- 図 4. 1 1 3パルスPWMと6多重出力電圧波形
- 図 4. 1 2 変換器直流リップル電流
- 図 4. 1 3 制御の基本原理図
- 図 4. 1 4 不平衡制御の全体構成
- 図 4. 1 5 系統連系インバータシステムの3相モデル
- 図 4. 1 6 正相非干渉制御ブロック図
- 図 4. 1 7 逆相非干渉制御ブロック図
- 図 4. 1 8 パルス演算の回路構成図
- 図 4. 1 9 自励式SVC実験装置
- 図 4. 2 0 自励式SVC出力電圧波形 (単独運転時 100V/div)
- 図 4. 2 1 逆相分静特性試験結果
- 図 4. 2 2 正相無効電流のステップ応答結果
- 図 4. 2 3 逆相無効電流のステップ応答結果
- 図 4. 2 4 負荷急変試験結果

- 図 4. 2 5 電鉄用不平衡補償装置の実用システム例
- 図 4. 2 6 装置構成と仕様
- 図 4. 2 7 フィールド試験結果
- 図 4. 2 8 フリッカ補償装置の主回路構成図
- 図 4. 2 9 6 多重 9 パルス PWM の出力電圧波形
- 図 4. 3 0 制御の基本構成
- 図 4. 3 1 電流の 2 軸変換
- 図 4. 3 2 補償電流指令の抽出演算
- 図 4. 3 3 DFT による高調波除去の原理
- 図 4. 3 4 検出信号とスペクトラムの演算
- 図 4. 3 5 DFT による 2 ～ 5 次高調波の除去
- 図 4. 3 6 電流制御系
- 図 4. 3 7 フィードフォワード制御を加えた電流制御系
- 図 4. 3 8 フィードフィードバック制御に対する系統モデル
- 図 4. 3 9 系統電圧検出の位相補正
- 図 4. 4 0 デッドタイム補償
- 図 4. 4 1 電圧動揺補償制御全体構成
- 図 4. 4 2 実験装置の仕様と構成
- 図 4. 4 3 無効電力出力設定精度評価試験結果
- 図 4. 4 4 出力電圧, 電流波形
- 図 4. 4 5 , 出力電圧, 電流高調波分析結果
- 図 4. 4 6 デッドタイム補償効果 (2ms/div)
- 図 4. 4 7 DFT フィルタの効果 (5ms/div)
- 図 4. 4 8 変化率制限あり, なしにおける設定急変応答波形 (10ms/div)
- 図 4. 4 9 アーク炉用電源システム構成図
- 図 4. 5 0 フリッカ補償用自励式 SVC の仕様と構成
- 図 4. 5 1 電流追従試験結果
- 図 4. 5 2 フリッカ補償用自励式 SVC の仕様と構成

表 4. 1 解析ケース

表 4. 2 多重数, パルス数と出力高調波

表 4. 3 他励式 SVC と自励式 SVC の比較

表 4. 4 補償精度評価結果

第 5 章

- 図 5. 1 直列形補償器の基本構成と出力電圧ベクトル図
- 図 5. 3 可変リアクタンス装置の基本構成
- 図 5. 4 可変リアクタンス装置の等価回路

- 図 5. 5 可変リアクタンス装置
- 図 5. 6 可変リアクタンス装置による等価コンデンサ回路
- 図 5. 7 可変リアクタンス装置の制御構成
- 図 5. 8 可変リアクタンス装置の抵抗動作モデル
- 図 5. 9 不平衡補償を考慮した可変リアクタンス制御
- 図 5. 10 可変リアクタンス装置による限流制御回路
- 図 5. 11 系統短絡事故時における直列形補償器の保護
- 図 5. 12 3 巻線トランスの三次巻線短絡による保護
- 図 5. 13 3 巻線トランスを用いた直列形補償器の保護
- 図 5. 14 3 巻線トランスの等価回路
- 図 5. 15 系統短絡事故時の保護シーケンスフローチャート
- 図 5. 16 シミュレーションモデル
- 図 5. 17 平衡負荷投入時の補償過渡特性
- 図 5. 18 不平衡負荷に対する補償特性
- 図 5. 19 実験装置
- 図 5. 20 負荷率に対する電圧補償特性 (平衡負荷)
- 図 5. 21 補償率を変化させたときの電圧補償特性 (平衡負荷)
- 図 5. 22 負荷率に対する不平衡電圧補償特性 (端子電圧)
- 図 5. 23 負荷率に対する不平衡電圧補償特性 (不平衡率)
- 図 5. 24 補償率に対する不平衡電圧補償特性 (不平衡率)
- 図 5. 25 過渡応答試験結果 (三相 R L 負荷)
- 図 5. 26 補償動作波形 (三相 R L 負荷)
- 図 5. 27 電圧高調波測定結果 (三相 R L 負荷)
- 図 5. 28 電流高調波測定結果 (三相 R L 負荷)
- 図 5. 29 インバータ出力電圧, 電流高調波測定結果 (三相 R L 負荷)
- 図 5. 30 限流動作確認試験
- 図 5. 31 短絡保護動作確認試験
- 図 5. 32 フィードフォワード制御系
- 図 5. 33 内部インピーダンス誤差を除去するフィードバック制御
- 図 5. 34 系統インピーダンス誤差を除去するフィードバック制御
- 図 5. 35 直列形補償器による電圧補償原理
- 図 5. 36 瞬時電圧補償の基本制御ブロック図
- 図 5. 37 瞬時電圧補償時の基本出力ベクトル図
- 図 5. 38 リアクタンス補償機能付き瞬時電圧補償制御ブロック図
- 図 5. 39 リアクタンス補償機能付き瞬時電圧補償のベクトル図
- 図 5. 40 リアクタンス補償機能付き瞬時電圧補償装置の構成
- 図 5. 41 リアクタンス補償機能付き瞬時電圧補償装置の特徴
- 図 5. 42 瞬時電圧補償装置のシミュレーションモデル
- 図 5. 43 下位側 L 負荷による電圧変動の補償解析結果

- 図 5. 4 4 下位側抵抗負荷による電圧位相変動の補償解析結果
- 図 5. 4 5 上位側負荷による電圧変動の補償解析結果
- 図 5. 4 6 瞬時電圧補償実験装置
- 図 5. 4 7 電圧補償静特性（下位側三相リアクトル負荷）
- 図 5. 4 8 電圧補償静特性（下位側単相リアクトル負荷）
- 図 5. 4 9 電圧位相補償（下位側三相抵抗負荷）
- 図 5. 5 0 電圧補償静特性（上位側三相リアクトル負荷）
- 図 5. 5 1 電圧補償静特性（上位側単相リアクトル負荷）
- 図 5. 5 2 過渡応答試験結果（下位側三相リアクトル負荷）
- 図 5. 5 3 過渡応答試験結果（上位側三相リアクトル負荷）

- 表 5. 1 電力系統におけるインピーダンスの例（架空送配電線）⁽⁷⁵⁾
- 表 5. 2 電圧，電流総合歪み率
- 表 5. 3 瞬時電圧補償実験装置の仕様
- 表 5. 4 可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置の比較

第6章

- 図 6. 1 直並列形補償器の基本構成
- 図 6. 2 等価回路
- 図 6. 3 直並列形補償器の構成と制御検出点
- 図 6. 4 直並列形補償器の補償機能
- 図 6. 5 直列部と並列部の配置と電力フロー
- 図 6. 6 力率に対する直並列形補償器の装置容量
- 図 6. 7 直列部と並列部の配置と電圧制御の関係
- 図 6. 8 直並列形補償器の制御構成
- 図 6. 9 シミュレーションモデル
- 図 6. 1 0 下位側負荷による電圧変動補償特性
- 図 6. 1 1 上位側負荷による電圧変動補償特性解析結果
- 図 6. 1 2 三相不平衡電圧補償特性解析結果
- 図 6. 1 3 過渡応答特性解析結果
- 図 6. 1 4 実験装置の構成
- 図 6. 1 5 実験回路構成（下位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 1 6 電圧補償動作波形（下位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 1 7 電圧補償特性（下位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 1 8 実験回路構成（下位側単相誘導性負荷）
- 図 6. 1 9 不平衡電圧補償特性（下位側単相誘導性負荷）
- 図 6. 2 0 不平衡電圧補償動作波形（下位側単相誘導性負荷）

- 図 6. 2 1 抵抗負荷による位相変動補償波形（下位側三相抵抗負荷）
- 図 6. 2 2 実験回路構成（上位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 2 3 電圧補償特性（上位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 2 4 電圧補償動作波形（上位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 2 5 実験回路構成（上位側単相誘導性負荷）
- 図 6. 2 6 不平衡電圧補償特性（上位側単相誘導性負荷）
- 図 6. 2 7 電圧補償過渡応答（下位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 2 8 電圧補償過渡応答（上位側三相誘導性負荷）
- 図 6. 2 9 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 0 各補償方式による受電端電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 1 各補償方式による負荷端不平衡電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 2 各補償方式による受電端不平衡電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 3 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較（上位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 4 各補償方式による負荷端不平衡電圧補償特性の比較（上位側誘導性負荷）
- 図 6. 3 5 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較
- 図 6. 3 6 補償対象の配電系統
- 図 6. 3 7 負荷配置
- 図 6. 3 8 無補償時の系統電圧
- 図 6. 3 9 補償装置設置点
- 図 6. 4 0 各補償方式の構成
- 図 6. 4 1 電圧補償時の等価回路
- 図 6. 4 2 各補償方式における電圧補償特性
- 図 6. 4 3 各補償方式における所要装置容量（並列補償容量で規格化）
- 図 6. 4 4 各補償方式における送電損失（無補償時の損失で規格化）
- 図 6. 4 5 直列補償と並列補償の電圧補償特性
- 図 6. 4 6 直並列補償の補償パターン
- 図 6. 4 7 各補償パターンの補償容量
- 図 6. 4 8 直並列形補償器の高機能的な出力設定制御部

表 6. 1 直並列形補償器の電圧補償機能

表 6. 2 直並列形補償器の実験装置仕様

第 1 章

序論

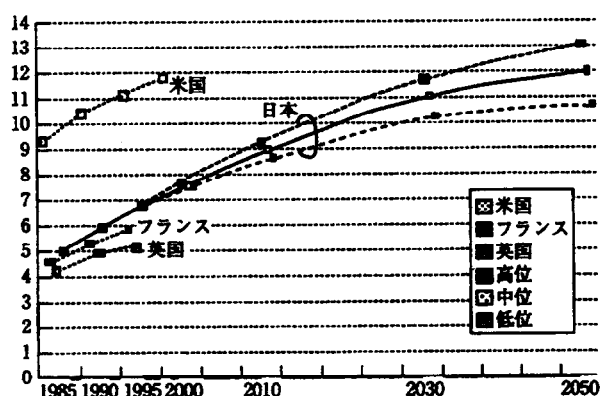
第1章 序論

1. 1 研究の背景

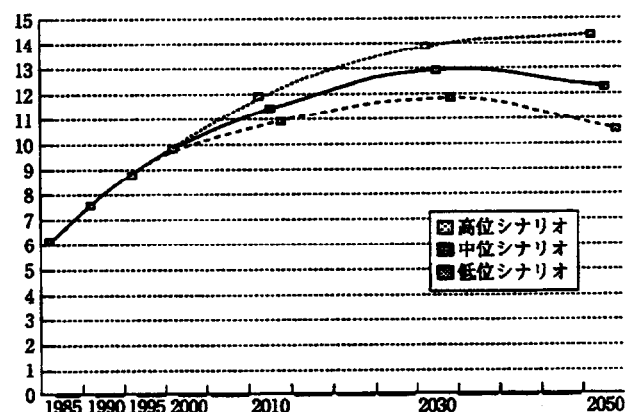
(1) 電力需要の推移と電力事情

電気エネルギーは、他のエネルギーに比べ、極めてクリーンで使い易い特長を持っており、全世界でこのエネルギーへの依存率は、ますます高くなっていくものと予想される。従来、わが国における電力需要は、エネルギー需要全体の伸びを上回り、年率4%以上で伸張してきた。そして、産業の景気動向にある程度影響されるものの、今後も一人当たりの電力消費量は増加し、人口の推移を考慮しても、電力需要は2030年までに20世紀末の1.5倍前後にまで達するものと考えられている。図1.1は、これを示すものであり、一人当たりの電力消費と電力需要の推定を表している。^{(1) (102)} このことから、発電及び送電を行う電力設備の増強、或いは機能強化が、今後も継続して要求されていくと予想できる。

一方、地域的に電力の需要と供給を見たとき、大都市圏への機能の集中は依然として継続し、都市部の電力需要もこれに伴って確実に増加していくものと予想される。ただし、原子力発電はもとより、火力発電も大都市近傍での新規立地は極めて厳しい状態にある。そこで、太陽光や風力発電をはじめとする新エネルギー源を利用した分散電源の都市部、都市近郊部への導入が加速されるものの、全体の傾向としては広域用電源などによる電源の遠隔化、集中化、大容量化が進むと予想されている。



(a) 一人当たりの電力消費の推定 (MWh/年)



(b) 電力需要の推定 (億 MWh)

図1.1 電力消費と電力需要の推定⁽¹⁰²⁾

第1章 序論

以上の結果、電力需給の地域的アンバランスから、大電力長距離送電の必要性が高まる。特に都市内においては送電線建設立地の確保が困難であるため、都市近郊を中心にして、より重潮流化が進む。この電力系統の重潮流化は、時に大停電事故を引き起こす原因となる。表1. 1に示すのは、国内外での大停電発生事例であり、太字網掛け部は系統の過負荷による電圧変動が原因となっている。

表1. 1 国内外の大停電事故の事例

発生箇所	発生年月日	停電規模 (MW)	停電時間	要 因
日本中地域	1965. 6. 22	3, 400	2	鉄塔傾斜, 地絡, 脱調⇒周波数低下
ニューヨーク	1977. 7. 13	6, 000	26	雷害, 2回線同時トリップ⇒送電線過負荷, 電圧変動
ケベック州	1977. 9. 20	10, 000	6. 5	PTの損傷
フランス	1978. 12. 19	29, 000	8. 5	送電線過負荷, 脱調⇒周波数低下
ケベック州	1982. 12. 14	15, 240	7	CTの破損
アメリカ西部	1982. 12. 22	12, 400	3. 5	風による鉄塔倒壊
スウェーデン	1983. 12. 27	11, 400	5. 33	送電線事故遮断, 過負荷, 動揺による異常電圧⇒連系遮断
フランス西部	1987. 1. 12	9, 000	数時間	火力トリップ, 電圧低下⇒発電所トリップ
日本東地域	1987. 7. 23	8, 200	3. 33	冷房需要増加⇒電圧安定性により3変電所が停止
アメリカ西部	1994. 12. 14	5, 000以上	4	送電線の事故遮断, 連系遮断⇒パシフィックインタータイが電圧低下でトリップ
アメリカ西部	1996. 7. 2	数1, 000	8. 33	送電線の事故遮断, 発電所トリップ⇒パシフィックインタータイが過負荷トリップ
アメリカ西部	1996. 8. 10	12, 000以上	数時間	送電線樹木と接触, 電圧変動⇒連系分離, 発電機トリップ, 負荷遮断

更に電力市場の自由化、規制緩和は、以下の通りに進んできており、この結果、送配電系統の様々な箇所へI P P (Independent Power Producer) や分散電源の設置が促進され、電力系統の運用・制御を一層複雑化していくものと考えられる。

- ・ I P P事業の開始 1995年
- ・ 電力小売 部分自由化 2000年

表1. 2に示すのは、電力中央研究所が行った分散電源と電力貯蔵の今後の導入推定であり、21世紀中葉までに相当量の導入が予想されている。

この様な状況になると、電力が上位系統から下位系統へのみ流れると考えることができなくなり、変圧器のタップ切替や調相用コンデンサ、分路リアクトルなど、現状の受動的系統制御技術では、電力の安定供給と電力品質維持に困難が生ずることが予想されている。⁽²⁾

表1. 2 21世紀中葉の分散型電源・電力貯蔵の導入量の推定⁽¹⁰²⁾

発電形態	考え方の概要	設備容量 (万 kW)
IPP	潜在的参入規模 3800～5200 万 kW（基本政策小委員会 '97）のうち、現行制度下で参加意志のある 2800 万 kW 程度までに達するとした。このうち分散型に属するのは 10%とした。	240～255
コージェネ (除、燃料電池)	将来は特に民生用が伸びるとし、コージェネのうち 20% が民生用（現在は 15%程度）かつ分散型であるとした。	240～280
廃棄物発電	省エネ、省資源からコージェネと同様に一定比率で増加するとした。需要地内に設置されて全て分散型。	600～650
太陽光発電	導入箇所別の潜在量 1.3 億～1.9 億 kWp の 20～30%を導入量とみた。これは住宅設置のみでは、2050 年で一戸建て住宅の約 30%，集合住宅の 5%強に設置されることに相当する	2800～4500
燃料電池発電	2010 年以降、民生用コージェネよりも高い普及率を想定。ほぼ全てが分散型。	702～882
風力発電	立地点が限られることから、平成 6 年の電事審の想定値の 2 倍を上限とした。	33～36
電力貯蔵	系統全体としての適正な貯蔵設備容量を 10～15%とし、2000 年からの増分の半分が分散型であるとした。	665
合計		5280～7268

一方、負荷側に目を向ければ、高度情報社会への移行や産業のハイテク化、国民生活の質的向上から、例えば電圧動揺や瞬時電圧低下、停電などが需要家へ重大な影響を与えるものとなり、電圧、周波数など電力品質の維持向上が一層強く要求される傾向にある。以上の傾向を図 1. 2 にまとめて示す。

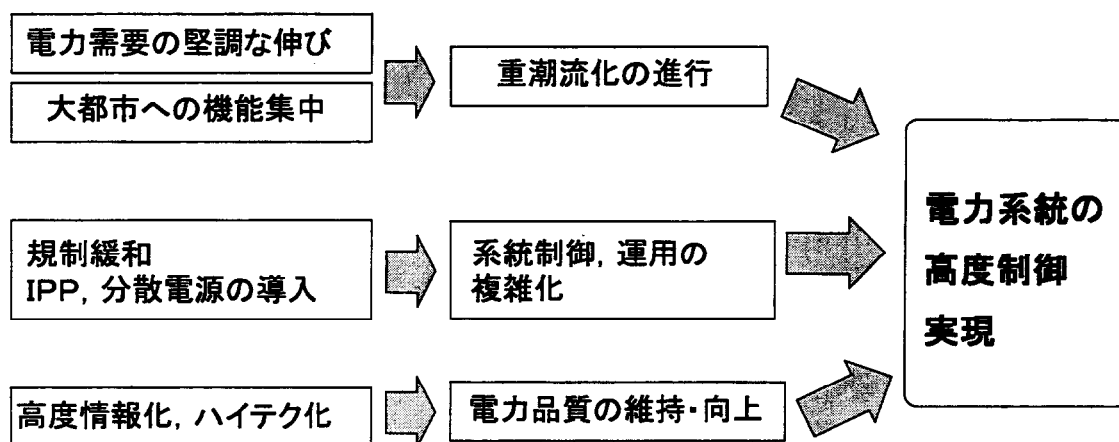


図 1. 2 電力系統をとりまく状況

(2) 技術動向

前述した通りの電力を取り巻く環境から、現有の電力系統をより効率的に運用する要求が高まり、系統制御技術の高度化、高性能化が望まれている。この課題に応える新しい技術として、パワーエレクトロニクスが注目され、これをベースとした電力系統の制御技術に大きな期待が寄せられている。

パワーエレクトロニクス技術はもともと産業分野を中心に、整流器やモーター駆動装置など適用範囲を広げ、その技術的發展を遂げてきた。この技術の電力分野への応用は1970年代から開始され、周波数変換装置や無効電力補償装置（SVC）、直流送電（HVDC）などが実用されてきた。そして、パワーデバイスの高圧・大容量化や制御装置の高性能、高信頼化など、近年のパワーエレクトロニクス技術の進歩と共に、電力系統への適用を更に拡大しようとしている。(3)～(11)

図 1. 3は、現状の電力用半導体素子の適用範囲を示すものであり、デバイス単体の処理電力と動作周波数の双方に対して、今後も飛躍的な拡大、向上が予想される。

このような技術革新を背景として、日本国内では各電力会社による連系強化プロジェクトが進められている。表 1. 3, 図 1. 4に、そのスケジュールと開発体制を示す。このプロジェクトでは、6 kV, 6 kA GTOサイリスタを用いた大容量自励式変換器や、8 kV光サイリスタバルブの開発され、直流送電や周波数変換装置の大容量・高性能化が進められている。(12)～(14)

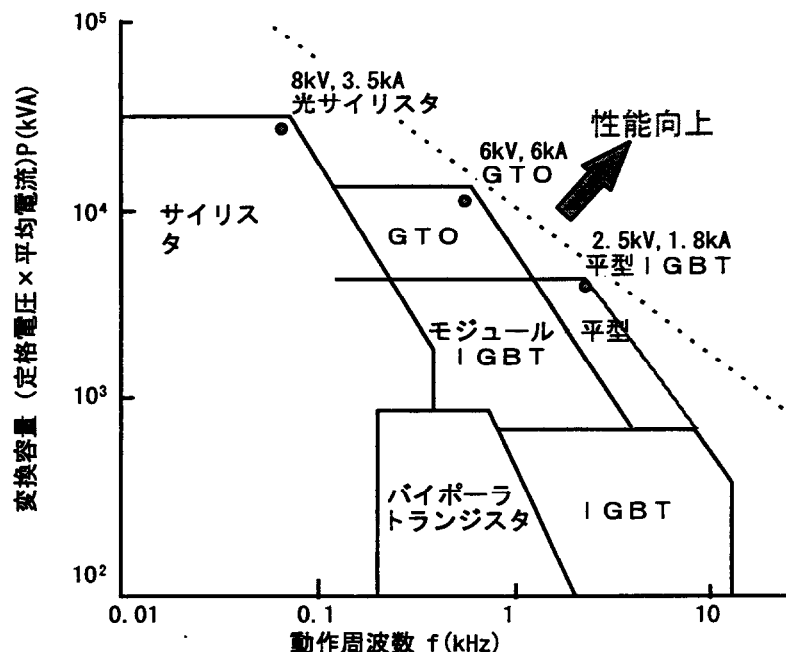


図 1. 3 パワー半導体のデバイスマップ

表1. 3 連系強化技術開発の研究課題とスケジュール

項 目	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11
1. 交流系統の送電機能向上方策								
(1) 内外の実態調査								
(2) モデル系統による解析・評価								
(3) コスト評価								
(4) 縮小モデルの開発・検証								
(5) 実証試験								
2. 直流多端子送電								
(1) 内外の実態調査								
(2) モデル系統による解析・評価								
(3) 制御・保護装置の開発・検証								
(4) 実証試験								
3. 高性能直交変換装置								
(1) 変換器の開発								
・自励式変換器の特質調査								
・変換器の要素技術開発								
・制御・保護方式の検討								
・実証試験								
(2) 素子の開発								
・シミュレーション解析								
・機能試作								
・素子開発								

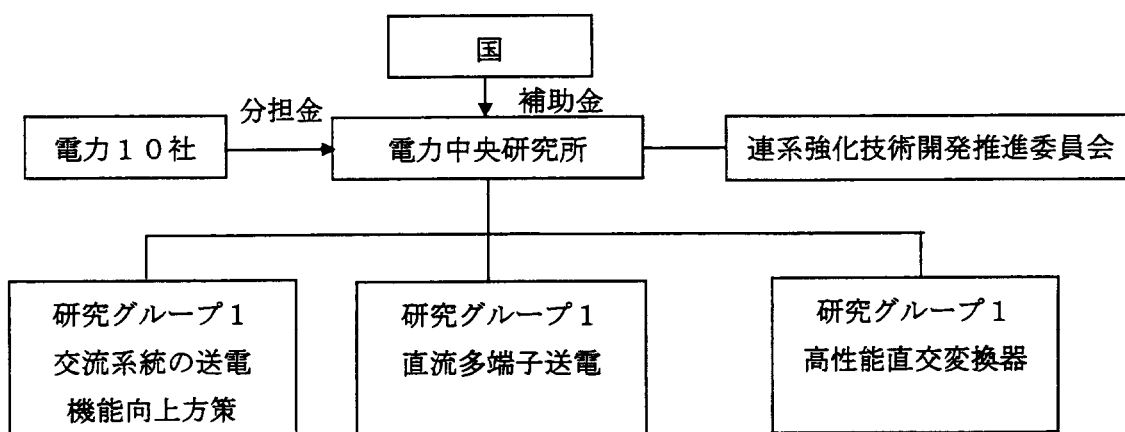


図 1. 4 連系強化技術開発の実施体制

また海外に目を向けると、特に電力系統網が複雑化し、重潮流の進んだ米国においては、現有の交流電力系統を高度制御により有効活用することが、さらに緊急な課題となっている。これに対して、1986年頃より、交流電力系統の高性能化を目指したFACTS (Flexible AC Transmission Systems) 構想が提唱され、現在も活発に実用開発が進められている。この中で、パワーエレクトロニクスの電力系統への応用が、日本と同様或いはそれ以上積極的に進められている。^{(15)~(22)} 表1. 4は海外におけるFACTS機器の開発状況を表している。

表1. 4 海外におけるFACTS機器の開発状況

機器	年	場所	製作社	備考
SVC	1977年以降	世界各地で設置されている	各メーカ	1995年現在 35GVA 1セット当たりの容量は 60～600MVA
NGH SSRダンパー	1980年	米国 Southern California Edison	SIEMENS	EPRI の援助
STATCOM (自励式 SVC)	1996年	TVA	WH	100MVA, EPRI
TSSC	1991年	AEP の Kanawha River	ABB	フィールド試験 788MVA 345kV
TCSC	1992年	WAPA の Kayenta 変電所	SIEMENS	EPRI 165MVA×2 235kV 既設線の送電容量 33%増
	1992年	BPA の Slatt	GE	EPRI 202MVA 500kV
TCBR	1994年	Minesota P&L	—	EPRI 過渡安定度解析のみ
UPFC (Unified Power Flow Controller)	1999年	AEP の Inez 変電所 (138kV)	WH	直列部 160MVA+並列部 160MVA 並列部は 1997 年始め
	1997年	WAPA	WH	シミュレータスタディ
	1997年	EdF		7MVA、225kV

TSSC: サイリスタ開閉直列コンデンサ

TCBR: サイリスタ制御制動抵抗

1. 2 研究の目的と概要

一般に電力系統における電力品質の主たる制御対象は、周波数（または有効電力）と電圧（または無効電力）そして事故による系統崩壊防止が挙げられる。本研究では、これらのうちで身近な課題であり、また影響度も高い系統電圧の制御に研究の焦点を絞る。系統電圧が潮流変化に影響されて変動し、許容範囲を超えて低下すると電気機器の誤動作につながり、上昇すれば機器損傷に至る。また、重負荷の変動等に伴って系統電圧が動揺すれば照明のちらつき（フリッカ）を引き起こす。更に、三相電圧の不平衡はモーターの過熱損傷の原因となり、電圧の短時間で急激な落ち込み（瞬時電圧低下）も電子回路で制御される機器の誤動作を引き起こすことになる。本研究は、これら系統電圧における種々の問題を抑制・改善する電圧制御において、変圧器タップ切替や調相用コンデンサなど従来の受動的制御機器では解決できない要求機能に注目し、これに対応できるパワーエレクトロニクス技術として、自励式変換装置を用いた新しい能動的電圧制御（補償）方式の開発を目的としている。

この検討に当たっては、まず基礎データの把握として、送配電系統における現状の電圧に

関する諸問題について、その発生時の様相と発生原因、及びこれに対する規制値について調査検討する。更に、これらの諸問題に対する従来の調相設備や直列コンデンサなどの受動的な系統電圧制御方法とその特徴を示し、従来対策方式の制御上の限界や問題点を明確にする。そしてこの検討に基づいて、パワーエレクトロニクス技術をベースにした系統電圧制御への具体的要件を示し、この要件に応える自励式変換装置を用いた新しい系統電圧安定化装置について検討を進める。この検討においては、新しい系統電圧安定化装置を、体系的に扱ってその補償特性を解析、検討すると共に、装置の実際の応用を目的とした技術開発を行うこととする。

この自励式変換装置による系統電圧安定化装置は、電力系統に直列接続される直列形補償器と、系統に並列接続されて用いられる並列形補償器とに分類できる。そこで本研究では、まずこれら直列形補償器と、並列形補償器各々の基本特性を解析的に求め、それぞれの補償特性と適正設置個所を明確にする。そして、直列補償、並列補償それぞれの特長を活かした新しい制御機能とその実用について、具体的装置の研究を進める。

本研究では並列形補償器として、自励式インバータにより構成される自励式無効電力補償装置（自励式SVC）を取りあげる。図 1. 5はこの自励式SVCの基本構成と等価回路を示す。自励式SVCは連系リアクトルを介して系統に接続される電圧源として動作し、系統に対する電圧振幅を変換器の電圧制御によって変化させることで、進み／遅れ双方の無効電力を自在に調整できる装置である。

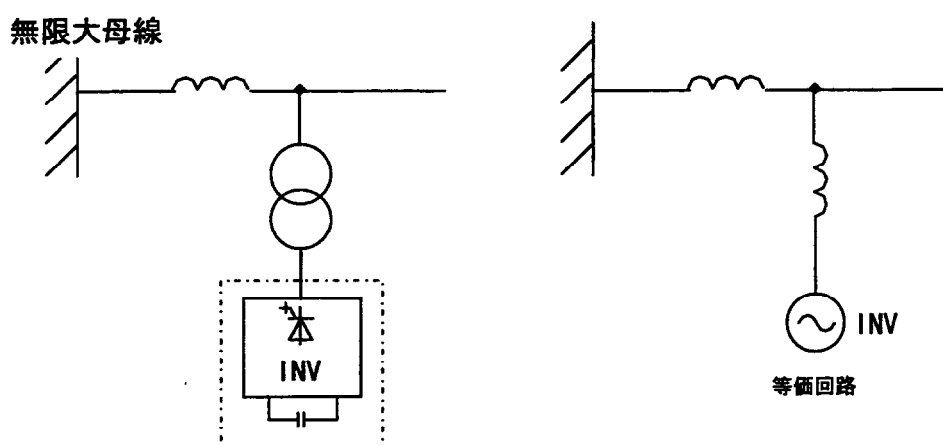


図 1. 5 自励式SVCの基本構成と等価回路

まず並列形補償器の検討の冒頭では、これまで広く実用化されて来た他励式SVC（TCR：Thyristor Controlled Reactor 図 1. 6 参照）と、この自励式SVCとを詳細に比較解析し、自励式SVCの能力の高さを定量的に明らかにする。他励式SVCはリアクトルに印加される電圧を、サイリスタの点弧角制御により調整する方式のため、遅れ方向の無効電力のみの制御しかできないのに対して、自励式SVCは、前述のように進み／遅れ両極性の無効電力を発生する電圧源として動作する。このため、単純な無効電力補償を行う際、自励式SVCは他励SVCの装置容量の1/2ですむことは周知のことであるが、ここでは三相不平衡補償を行う場合について比較検討する。また、自励式SVCの特徴でもある応答

速度についても比較検討を行う。

自励式SVCも、既に単純な電圧（無効電力）補償については100MVA級の装置が実用段階に入っている。⁽⁴²⁾そこで、本研究は新しい装置として、特に従来の受動的補償装置では実現できない三相不平衡補償と、電圧動揺補償に対する高性能・高機能制御について応用研究を進める。この中では、制御性能を実験検証すると共に、実システムでの有効性について実機フィールド試験まで行って評価を行う。

直列形補償器は、FACTS構想における開発アイテムでもある高速移相器（図 1. 7 参照）と同様の構成をしている。もともと高速移相器は、系統電圧の位相調整によって、ループ系統での潮流を高速、無段階に制御しようとするものであり、この潮流制御機能に注目した研究が多く報告されている。^{(66)~(72)}

本研究では、高速移相器に、この位相調整機能に加え、系統電圧または電流に応じて変換器出力電圧を系統に直列に注入することにより、可変リアクタンス動作、電圧調整動作が可能となることに着目している。⁽⁷⁴⁾これらの動作を利用した新しい系統電圧補償装置を研究するものである。前記の並列形補償器は一部実用段階であるのに対して、この直列形電圧補償器の実用化はこれからであるため、主回路方式を含め制御、保護など実用を目的に総合的な検討を進める。

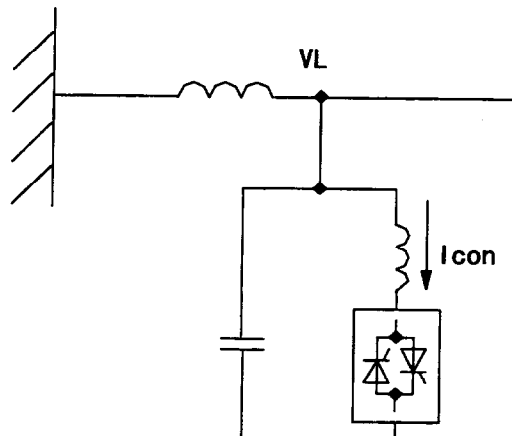


図 1. 6 他励式SVCの基本構成

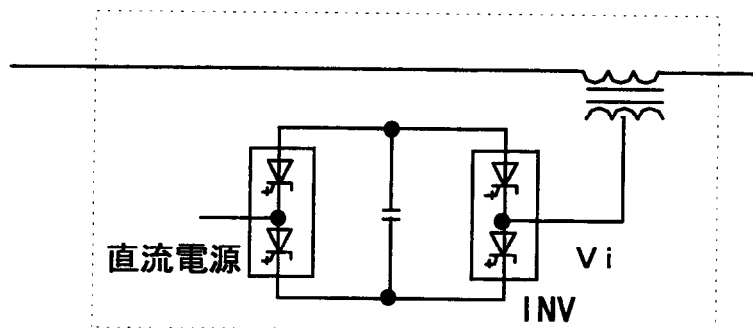


図 1. 7 高速移相器の基本構成

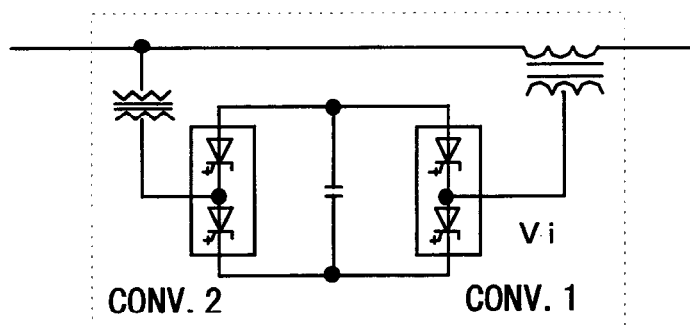


図 1. 8 UPFCの基本構成

そして最後に、並列補償部とこの直列補償部とを併せ持った直並列形補償器について検討を行う。この装置はFACTS構想の中で言うUPFC（Unified Power Flow Controller 図 1. 8 参照）と同じ構成であるが、UPFCが本来潮流制御を目的としているのに対して、直並列形補償器は系統電圧補償を行う点に特徴がある。この直並列形補償器は、前述の並列形補償器と直列形補償器双方の補償能力を有する装置となることが期待できる。本研究ではこの高機能な補償装置の制御方式を導き、その性能を実験検証する。そして、直列形補償器および並列形補償器単独の場合と、補償性能の比較検討を行い、その実用性を評価する。

1. 3 論文の構成

本論文は、研究の背景と目的を述べた本章（第1章）を含め、7つの章から構成されている。

第2章では、パワーエレクトロニクスによる系統電圧安定化装置を開発するにあたり、まずその必要性を示し、装置への要求条件を明確にすることを目的としている。そこで、まず現状の電力系統での電圧変動、電圧動揺、三相不平衡など電圧に関する諸問題について、原因、様相、影響等について調査結果を述べる。そしてこれらの電圧諸問題に対する、タップ付き変圧器や調相用コンデンサ、リアクトルなど、現状の対策方法と特徴、その制御限界や問題点を示すとともに、この中で新しい対策装置の要求条件を明確にする。更に、この要求に応える対策方式として、自励式変換器を用いた新しい系統電圧安定化装置について述べる。ここでは、その概要として、系統に直列接続される直列形補償器と並列接続される並列形補償器とに大別し、それぞれの特徴を述べる。

第3章では、直列形補償器と並列形補償器に大別される系統電圧安定化装置の電圧補償特性を簡略モデルを用いて解析的に求め、これら直列形補償器、並列形補償器それぞれの補償特性を比較検討する。そして、この解析結果に基づき、これらの補償器を設置する適正箇所について言及する。

第1章 序論

第4章では、自励式変換装置を用いた並列形補償器として、新しい自励式SVCについて述べる。論文ではまず、自励式SVCと他励式SVCの性能を理論とシミュレーションにより比較検討する。この中で、自励式の補償装置が他励式のそれに比べ特に、三相不平衡補償性能と高速制御性能に優れることを示す。この検討に基づき、実際にこれらの特長を活かした自励変換器による新しい応用として、三相不平衡補償機能と電圧動揺補償機能の開発を示す。これらはいずれも実験と実機フィールド試験で実用性能を検証する。

第5章では、自励式変換装置を用いた直列形補償器の開発について述べる。これは電力系統の潮流制御を目的とした半導体式高速移相器と同様の構成であるが、本研究ではその電圧補償機能に注目する。そして具体的応用として、送電線路リアクタンスを補償して系統電圧を制御する可変リアクタンス装置と電圧を直接制御する瞬時電圧補償装置の開発を示す。これらの検討においては、装置の実用がこれからであることから、主回路方式、制御方式、保護方式など、総合的な検討を行っており、その結果を示している。

第6章では、前章までに述べた直列形補償器と並列形補償器を一体化した、更に高機能な系統補償装置である直並列形補償器について述べる。これは、UPFC (Unified Power Flow Controller) と同様の構成であるが、その直列部により系統上位側に起因した電圧障害を補償し、並列部によって系統下位側による電圧障害を補償するものである。これを系統の中間点に設置することで、系統の上位側、下位側それぞれで発生した電圧変動等の障害を一括して補償することができる。本章では、この補償動作原理を示し、その制御方法を導くと共に、実験によりその性能を検証している。そして、これを配電系統へ適用することを想定したフェージビリティスタディについても述べる。この中では、直列形補償器及び並列補償器単独の場合と補償性能を比較して検討し、これらの適用性について述べている。

第7章では、以上本研究の結論を述べ、今後の課題を示す。

第2章

電力系統の電圧に関する諸問題と対策技術

第2章 電力系統の電圧に関する諸問題とその対策技術

2. 1 まえがき

今後も電力需要の堅調な伸びが見込まれ、発電送電設備の継続的な増強が必要と予想される中で、産業のハイテク化や国民生活の高度情報化などにより、電力の質に対する維持向上の要求が高まりつつある。特に電力品質の大きな要素である、系統電圧の変動、動揺、不平衡など、電圧に関する問題への対応が、大きな課題になるものと考えられる。

本章では、この系統電圧に関連する諸問題に注目し、それぞれの発生原因とこれが機器等へ及ぼす影響を明確にすると共に、これらに対する現状の規制レベルの調査結果を示す。

そして、この電圧に関する諸問題を解決するための現状の調整、補償技術を取り上げ、これらが持つ課題を示す。更に、この課題を克服することのできる高性能、高機能な新しい補償方式について述べる。

2. 2 電力系統の電圧に関する諸問題

電力系統の電力品質を述べるとき、最も重要な要素の一つが電圧である。ここでは、電力系統において発生する電圧に関する問題を下記のように分類し、その発生の様相と要因及びこの現象が系統構成機器に与える影響と現在の規制値について述べる。^{(23) (24)}

電力系統の電圧に関する問題

- ① 電圧変動（長周期電圧変動）
- ② 電圧動揺（短周期電圧変動）
- ③ 三相電圧不平衡
- ④ 瞬時電圧低下
- ⑤ 高調波

2. 2. 1 電圧変動（長周期電圧変動）⁽²⁵⁾

（1）発生の様相と原因

電力系統において発生する電圧問題としてまず挙げられるのは、電圧の定常的或いは長周期的（数十分以上）の上昇や低下である。これは、日間、季節間での負荷変化や系統構成の変化によるものと考えられ、以下のごとく発生の様相とその原因が区分される。

表 2. 1 系統電圧変動の様相と原因⁽²⁵⁾

電 圧 様 相	原 因
長距離送電線の受電端電圧低下	・大容量電源脱落 ・長距離大電力送電
無効電力不足による電圧低下 (公称電圧の90%近くまで低下)	・負荷の急激な増大 ・低力率負荷の増加
無効電力過剰による電力上昇 (公称電圧の110%近くまで上昇)	・特殊日や深夜の負荷減少

(2) 電圧変動が及ぼす影響とその規制値

電力系統の電圧変動はこれにつながる電気機器の過電圧や過負荷など、動作の支障や損壊を招く恐れがある。系統電圧の運用においてはまず、電力設備機器の上下限を逸脱せず、機器が正常に稼働できることが前提となる。電気機器の電圧許容限界は次の通りと報告されている。

表 2. 2 電気機器の電圧許容限界⁽²⁵⁾

分 類	許 容 限 界 値
電力系統機器	連続許容限界： +5～10% ～ -5% 短時間許容限界： 上限：時限特性 下限：同期機以外支障無し 瞬時電圧低下限界： 同期機 -25% (1秒) その他の機器 定格電圧以下は支障無し
産業用機器	連続許容限界 +5～10% ～ -5～10% 短時間許容限界 大部分連続値と同様 瞬時電圧低下限界 -10%程度

このため、以下の需要家供給電圧の基準を維持することが決められている。

表 2. 3 需要家電圧の基準⁽²⁵⁾

系統区分	電圧基準値
配電系	通産省令で定められる電圧の値 (電気事業法第26条電気事業法施行規則第25条) 標準電圧 100V 101V±6V 200V 202V±20V
高圧需要家ならびに 特高需要家	省令無し。各社によって運用 高圧 6.0 ～ 6.9 kV 3.0 ～ 3.45 kV 許容変動幅 10%程度
特高需要家	個別対応

以上のことから、各電力会社では表 2. 4 次のような運用基準をもとに、後で述べる系統制御機器を用いて系統電圧を維持している。

表 2. 4 系統電圧の運用基準⁽²⁵⁾

基準系統電圧	電圧基準値	許容変動幅
22～77 kV 系統	重負荷 ほぼ100% 軽負荷 96%～100%	公称電圧の±1～2.5%
110～154 kV 系統	重負荷 96%～104% 軽負荷 94%～102%	同 上
187～275 kV 系統	重負荷 100%～104% 軽負荷 100%～104%	同 上

(3) 電圧の異常低下現象

電力系統の平常電圧は、後に述べるように、調相設備や発電機、変圧器タップによる電圧無効電力制御により上記の規定値が維持されている。しかし、朝や昼休みの前後の急峻な負荷変化や深夜の軽負荷時に対して、無効電力のバランスを保てない場合、いわゆる雪崩現象に近い電圧低下を発生することがある。この問題については2. 5. 1にて述べる。

2. 2. 2 電圧動揺（短周期電圧変動）

(1) 発生の様相と原因

ここでいう電圧動揺は前述の電圧変動に対して、比較的短周期（数分以内の短時間領域）の電圧変動をさす。これは、主として以下の原因によるものと考えられる。

① 単発／繰り返し電圧の上昇または低下：

電鉄や圧延機等の大容量、重負荷の投入、開放

② フリッカ電圧動揺：

製鋼用アーク炉に代表される大容量変動負荷への給電

このような電圧変動はモータの回転むらを生じさせて工業製品の質に影響を与えたり、発電所の負荷時電圧調整装置の動作頻度を増加させ、これを劣化させる恐れがある。また、フリッカ電圧動揺は、電灯照明のちらつきを発生する。

(2) 電圧動揺の規制レベル

電鉄や圧延機などの重負荷の変動による電圧変動に対しては、特に一般的な規制値は無く、電圧動揺を発生させる大口需要家と電力会社との間でそれぞれ個別に規制値の取り決めがなされているのが現状である。⁽²⁶⁾

製鋼用アーク炉によるフリッカは、電圧の変動を視感度曲線によって、一般に人が照明のちらつきに最も敏感になるとされる10 Hz 成分に換算した電圧フリッカ値（ ΔV_{10} ）⁽²⁷⁾で評価する。フリッカ電圧の許容値は一般的に100 V換算で最大0.45 Vが目安になる

第2章 電力系統の電圧に関する諸問題とその対策技術

が、これも発生元の需要家と電力会社との間で個別に規制値の取り決めがなされている。

いずれの場合も規制値をクリアするように、通常、需要家側が操業で工夫したり、或いは問題となる電圧動揺を抑制するための補償装置を需要家が設置している。

2. 2. 3 三相不平衡

(1) 発生の様相と原因

系統電圧の三相不平衡は次の原因によって生ずる。

- ① 系統送電線路インピーダンスの不平衡 (送電線路の撓架不足)
- ② 不平衡負荷の接続

このうち一般に主たる三相不平衡の原因は、後者の不平衡負荷であり、その代表を以下に挙げる。

- ① アーク炉、低周波誘導性負荷
- ② 一般家庭用電気機器負荷
- ③ 単相交流式電気鉄道負荷

(2) 三相不平衡の影響とその許容限度、規制レベル

三相電圧の不平衡は、電動機の脈動、巻線の加熱、三相変圧器の利用率低下、整流設備の整流リプル拡大等の影響を及ぼす。特に誘導電動機は、逆相インピーダンスが正相インピーダンスに比べて20%程度と小さいことから、注意を要する。

表 2. 5 は、不平衡電源に対するかご形誘導電動機の温度を示している。ここでは、不平衡率が5%のとき、温度上昇が10%程度となることが分かる。ただし、一般にはこの程度の温度上昇ならば製作上の余裕に入るものと考えられる。

表 2. 5 巻線形誘導電動機の不均衡試験結果⁽²⁸⁾

電圧不平衡率 (%)	4	5	6
電流不平衡率	0.234	0.294	0.351
全銅損比 ($1+U^2$)	1.055	1.085	1.123
温度上昇比	1.05	1.076	1.106

U: 電流不平衡率

次に電力事業者に対する影響とし積算電力計、無効電力計や保護継電器等の動作不良が考えられるが、これはかなり悪条件でないと問題にならない。しかし、不平衡発生点から三相系統へ流入する逆相電流は、系統の発電機などに逆相回転磁界を生じさせ、このため回転し回路には第2調波電流を誘導し、発電機電圧波形を悪化させるとともに、回転子の金属部分に発熱を生ずる恐れがある。発電機では一般に10%~20%が逆相電流の限界と考えられる。表 2. 6 に同期発電機の逆相電流の許容値を示す。⁽⁷⁾

表 2. 6 同期発電機の逆相電流の連続許容値⁽²⁹⁾

出典	円筒機	突極機	備考
IEC (国際電気標準会議) 規格34-1 (1969)	8%	12%	左記は100MW以下の場合、100MW以上の場合 はメーカー／ユーザー間の協議
CIGRE (国際電力技術会議) (1972)	(a) 間接冷却 10% (b) 直接冷却 960MVA以下 8% 960～120MVA 6% 1200～1500MVA 5%	10%	アメリカからNational American Standard Instituteの標準案として 提案されたもの

以上に対して、不平衡の原因となる需要家側への規制として下記が規定されている。

表 2. 7 不平衡負荷に対する規制

対象	規 制
一般家庭用電気機器負荷	JEAC8001-1972 により設備不平衡率を30%以内
交流電気鉄道負荷	告示第47条で 電鉄変電所受電点で電圧不平衡率3%以下

2. 2. 4 その他

上記以外に電力系統の電圧に関する問題として瞬時電圧低下と高調波が挙げられる。以下にそれぞれの様相と発生原因について述べる。ただし、系統事故に起因する瞬時電圧低下は保護機器に関連した技術を要し、また、高調波も前述とは異なる技術分野を要するため、系統電圧安定化の研究を目的とする本論文では、これら瞬時電圧低下と高調波に対する改善対策は、検討対象から除外することとする。

(1) 瞬時電圧低下⁽³⁰⁾

落雷等により系統の地絡、短絡事故が発生した場合には、事故を保護リレーで検出し、遮断器を開放して事故点を切り放す。この間に短時間の電圧低下つまり瞬時電圧低下が生ずる。近年、コンピュータやOA機器などの精密エレクトロニクス機器の普及につれて、瞬時電圧低下の問題がクローズアップされている。調査によれば、瞬時電圧低下は以下の様相を呈している。

- ① 20%以上電圧低下する回数は全国平均で5回／年
- ② 継続時間は0.2秒程度に80%集中
- ③ パワエレ機器やパソコンなどは瞬停により3回～9回／年影響を受ける可能性がある。

この瞬時電圧低下に対しては、事故点の高速な切り放しが要求させるが、これにも限界があ

第2章 電力系統の電圧に関する諸問題とその対策技術

り、瞬時電圧低下に鋭敏な機器に対しては、UPSの設置など需要家側での対策も必要となる。

(2) 高調波⁽³¹⁾⁽³²⁾

サイリスタ、ダイオード整流器やインバータの普及により、これらが動作するときに発生する高調波が問題となってきた。高調波は、近接した通信線の雑音源となったり、変圧器やコンデンサ設備の加熱、リレーの誤動作等を引き起こす恐れがある。これに対して、電気協同研究会報告46巻第2号『電力系統における高調波対策』（1990年6月）をベースに資源エネルギー庁の依頼により日本電気協会が更に高調波の調査検討を行った。そして、1994年10月に資源エネルギー庁より『高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン』『家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン』の指針が通達された。この後メーカーが作る新製品や事業所が設置する機器に対して、この指針に示された高調波上限値を越えないことが求められる様になっている。

2.2.5 電圧問題のまとめ

以上に述べた電圧問題について表 2.8にまとめて示す。

表 2. 8 電力系統における電圧問題のまとめ

問 題	様 相	原 因	影 響	規制／許容レベル	備 考
電圧変動 (長周期電圧変動)	長距離送電線の 受電端電圧低下	大容量電源脱落 長距離大電力送電	電気機器や系統設備の 過 負荷, 過電圧, 動作異常, 破壊	需要家電圧の基準 配電系 $101 \pm 6V^{*1}$ 202±20V 高圧系 (各社運用による) 6.0～6.9kV 3.0～3.45kV	*1 電気事業法第 26条電気事業法 施行規則第25条
	無効電力不足による電圧 低下	負荷の急激な増加 低力率負荷の増加			
	無効電力の過剰による電 力上昇	特殊日や深夜の負荷減少			
電圧動揺 (短周期電圧変動)	単発, 繰り返しの電圧上 昇又は低下	電鉄や圧延機等樹負荷の投 入, 開放	モータの回転むら OLTCの動作頻度増加	大口需要家と電力会社との 間で個別規制	
	フリッカ電圧動揺	製鋼用アーク炉負荷の動作	照明のちらつき		
三相不平衡	三相電圧不平衡 逆相電流の増加	線路Z不平衡 (燃架不足) 不平衡負荷 (アーク炉負 荷, 単相負荷)	電動機の過熱, 変圧器 利用率低下, 整流リブ ル増大	同期発電機の逆相電流耐量 円筒機 8% 突極機 12%	IEC34-1
その他 瞬時電圧低下 高調波	短時間の電圧低下 高調波電圧	地絡・短絡事故 パワエレ機器	機器の誤動作 コンデンサの過熱	高調波抑制対策ガイドライ ン	

第2章 電力系統の電圧に関する諸問題とその対策技術

2. 3 系統電圧の諸問題に対する現状の対策

前章で述べた電力系統の電圧に関する問題に対して、一般に以下の機器、装置によって対策を行っている。

- ① 発電機のAVRによる調整
- ② 送配電線路の強化（多ルート多回線化）
- ③ 負荷時タップ切換え装置による調整
- ④ 調相設備（電力用コンデンサ、分路リアクトル等）の設置
- ⑤ 直列コンデンサの設置
- ⑥ その他の電圧調整機器の設置

これらの特徴とその抑制対象を表 2. 9に示す。

表 2. 9 電圧問題への抑制対策

機器、装置	特 徴	抑制対象		
		電圧変動	電圧動揺	不平衡
発電機AVR	発電機自体の電圧制御	○	—	—
送電線路強化	線路インピーダンスの低減により系統電圧変動を抑制	○	○	○
負荷時タップ切替装置（OLTC）	変電所電圧に対する主制御機器技術成熟度、信頼性が高い。	○	△	—
調相設備	遅相、進相無効電力を発生して系統の電圧変動を抑制。 力率改善効果もあり。	○	○	—
直列コンデンサ	線路に容量性リアクタンスを挿入し線路インピーダンスを低減	○	○	—

○：補償効果あり

△：場合によって補償効果あり

2. 4 現状の電圧補償・改善方式の特徴

前節で述べた抑制対策の中で、発電機のAVRと送電線路強化、また発電所のOLTCについては、本来、電力系統運用における基本技術であり、ここでは対策として調相設備と直列コンデンサによる電圧維持対策について述べる。

2. 4. 1 調相設備による電圧維持対策の特徴

調相設備として、系統が軽負荷時に線路キャパシタンスにより上昇する電圧を抑制する分路リアクトル（Shr）や重負荷時に線路インダクタンスにより降下する電圧を是正するための電力用コンデンサ（SC）がその代表に挙げられる。

例えば、電力用コンデンサは以下の利点を持ち、現在電力系統で広く用いられている。

電力用コンデンサの利点

- ・保守が不要
- ・騒音，振動対策が不要
- ・安価
- ・力率改善により損失低減可能

（1）電力用コンデンサによる電圧補償の原理⁽³³⁾⁽³⁴⁾

系統の電圧特性の基礎的な概念を把握するために、図 2. 1 に示すような、1 電源，1 負荷，1 送電線の単純な系統を用いて特性を示す。

これより、負荷の力率角を Φ_r とすると、

図 2. 2 のベクトル図が書ける。

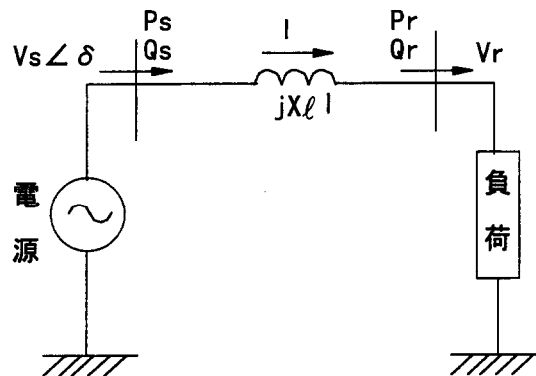


図 2. 1 1 電源 1 負荷 1 送電線の系統

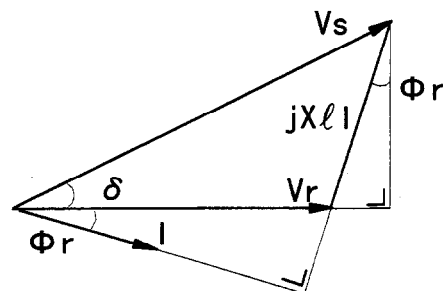


図 2. 2 電圧，電流ベクトル図

第2章 電力系統の電圧に関する諸問題とその対策技術

このベクトル図から次式が得られる。

$$Pr = \frac{Vs Vr}{Xl} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Qr = \frac{Vs Vr}{Xl} \cos \delta - \frac{Vr^2}{Xl} \quad (2.2)$$

更に、式(2.1)(2.2)から δ を消去すると次の関係式が得られる。

$$Pr^2 + \left(Qr + \frac{Vr^2}{Xl} \right)^2 = \left(\frac{Vs Vr}{Xl} \right)^2 \quad (2.3)$$

この式をもとに、力率を一定として受電端の電力と電圧の関係を示すP-V曲線(ノーズカーブ)が図2.3に示す通り描かれる。

この図より分かるように、通常の運転点においては、受電端電力が例えばP1からP2へと増加すると、受電端電圧がV1からV2へと低下する。そして、更に増加すると、限界電圧V(M)まで低下し、これ以上受電電力を増加することが不可能となる。

次に、電力用コンデンサによって電圧補償する場合を以下に示す。

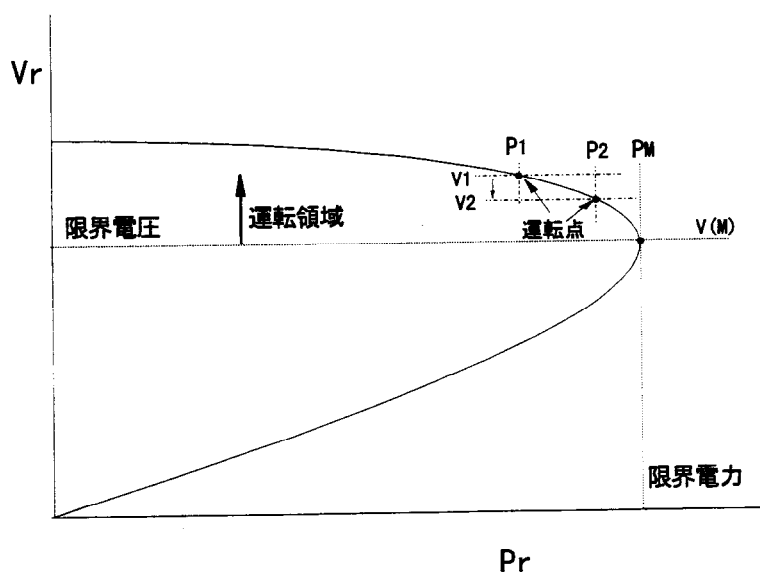


図 2.3 P-V曲線

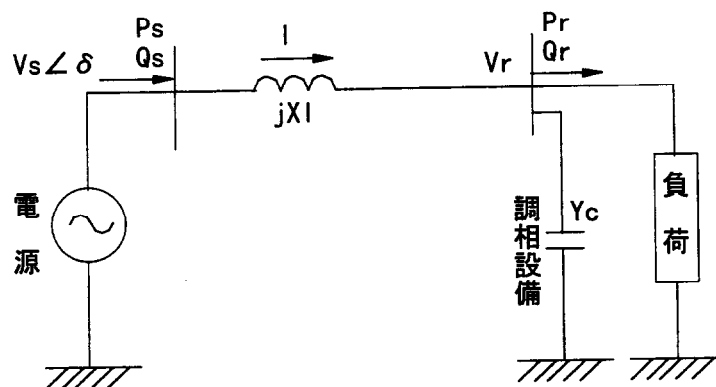


図 2.4 相設備を有した基本系統

図 2. 4は電力用コンデンサによる調相設備を持つモデル系統を示している。下式はこの系統における受電端の電力特性を表す。

$$Pr^2 + \left\{ Qr + \left(\frac{1}{Xl} - Yc \right) \cdot Vr^2 \right\}^2 = \left(\frac{Vs \cdot Vr}{Xl} \right)^2 \quad (2. 4)$$

ここで、

Pr :受電端有効電力

Qr :受電端無効電力

Vr :受電端電圧

Vs :送電端電圧

Xl :送電インピーダンス

Yc :電力用コンデンサのアドミッタンス

これより、電力用コンデンサによって系統電圧の補償を行った場合のP－Vカーブを同様に描くと図 2. 5が求められる。

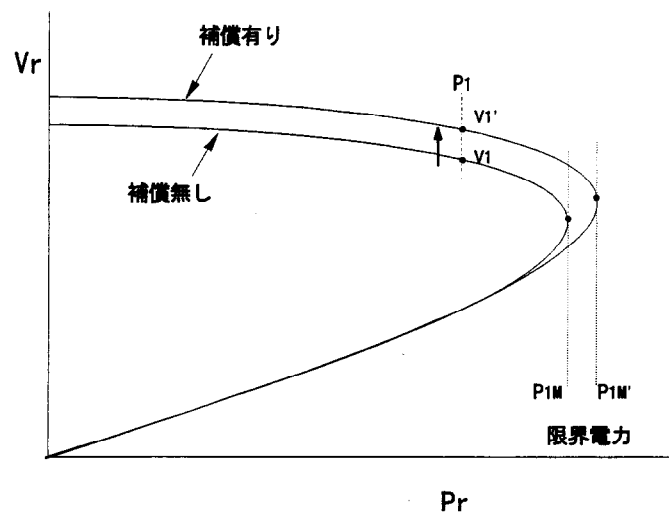


図 2. 5 電力用コンデンサにより電圧補償を行ったときのP－Vカーブ

電力用コンデンサによって補償することにより、同じ受電電力 P_1 に対して、受電電圧が V_1 から V_1' へと上昇していることが分かる。また、受電端の最大電力も P_{1M} から P_{1M}' へと増加していることもわかる。

(2) 電力用コンデンサによる補償の問題点（電圧ハンチング現象）

上記の電力用コンデンサにより系統電圧を補償する様子を図 2. 6示す。これは、調相設備として多群に分割された電力用コンデンサバンクを、負荷の増加による系統電圧降下に伴って順次投入したときのP－Vカーブの変化を示している。

これより、電圧の調整はコンデンサの分割数に依存してステップ的にしか行うことができないことが分かる。また、この投入総量、つまり補償総量が大きくなると、同容量のコンデンサの投入でも、そのときに生ずる電圧変化幅が大きくなってしまう点に留意しなくてはならない。これにより、電圧調整幅が規定値を超えて、コンデンサの投入と開放を繰り返すハンチング現象が発生してしまう恐れがある。

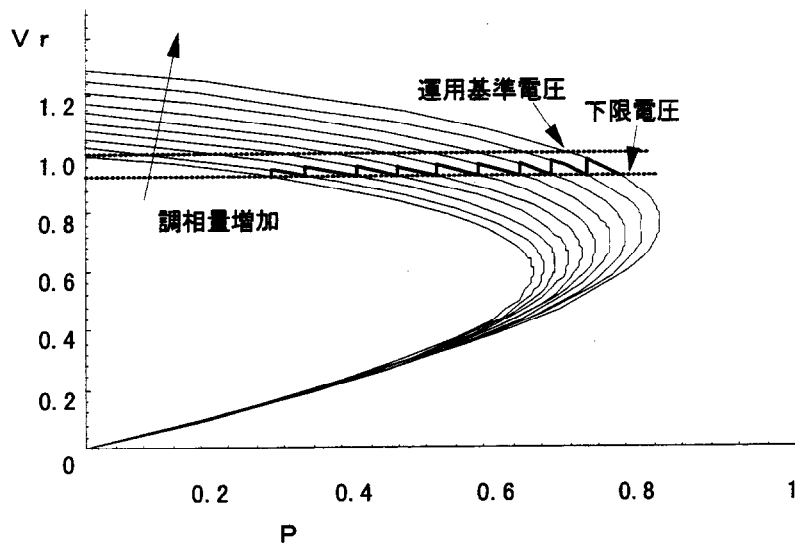


図 2. 6 調相用コンデンサによる電圧補償の様子

(3) 電力用コンデンサを用いたときの系統電圧の不安定現象

図 2. 7 に受電端の $P-V$ カーブと、ここにつながる負荷の特性曲線 (a, b, c) を示す (定電力特性で仮定)。これらの交点が、運転点となる。

- ・ 負荷特性 (a) : $P-V$ 特性との交点が複数個 (この場合 2 つ) ある。そのうち電圧の最も高い解を高め解と呼び、他の解を低め解と呼ぶ。通常の運転点は、安定な運転点である高め解に対応している。低め解は、負荷の増加に伴って電圧が増加する不安定な動作点となる。
- ・ 負荷特性 (b) : 負荷が増加し高め解と低め解が近づく状態。、更に増加すると限界電力点で一致する。限界電力点近傍では僅かな負荷変化が、大きな系統電圧変化を引き起こすため、運転が不安定傾向になる。
- ・ 負荷特性 (c) : 負荷が送電系統の限界電力を越えて増加しようとした状態。 $P-V$ カーブとの交点が存在しなくなり、運転不能となる。

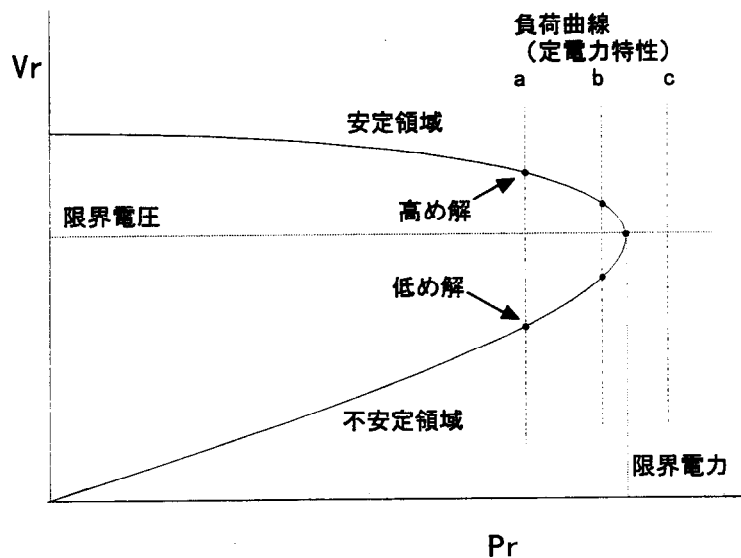


図 2. 7 不安定となる負荷特性

以上より、定電力特性或いはこれに準ずる負荷特性においては、運転点が限界電力点から極力離れて高め解を維持出来るように系統を制御する必要がある。

このとき、電力用コンデンサを増していくと、系統の電圧が持ち上がり、限界電力が大きくなる。しかし、一方で、図 2. 8 に示すように、限界電圧が運用電圧に接近してくる。更にこの傾向が続くと、いわゆる高め解*1が取れなくなってしまう安定な運転点で系統を運用することができなくなってしまう恐れがある。

通常の運転であればこのような状態となることはまず無いが、系統事故時に一回線遮断し、コンデンサによる補償度を上げたときには生ずることが考えられる。この様に電力用コンデンサによる受電端電圧の維持には限界がある。

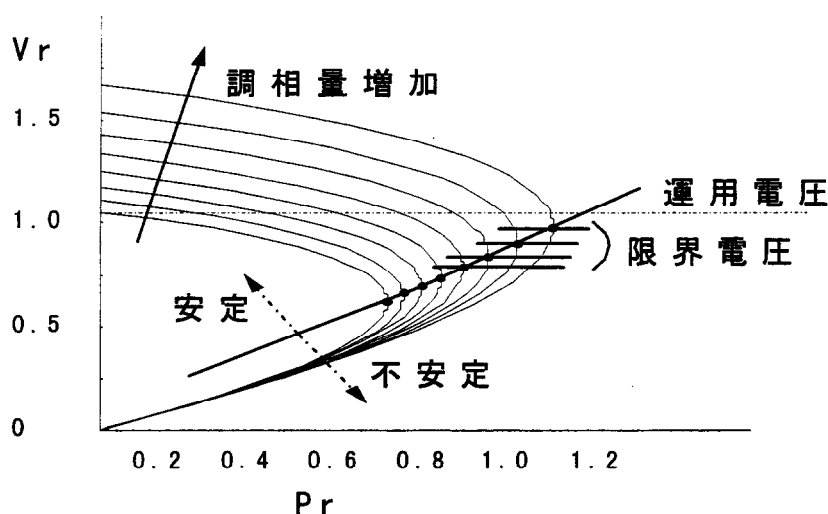


図 2. 8 電調相設備量をパラメータとしたP-Vカーブ

また、電力用コンデンサの投入開放は、機械式接点によって行うため、この動作が負荷の増加よりも遅くなることがある。この場合、電圧の雪崩現象が生じ、一気に停電に至ることがある。(35)

2. 4. 2 直列コンデンサによる電圧維持対策の特徴(36)

直列コンデンサは回路に容量性リアクタンスを挿入して線路リアクタンスを補償する。これにより、本論で対象とする電圧降下改善、電圧変動率の改善、不平衡の軽減を行うとともに、ループ潮流制御、長距離送電線の安定度改善に効果を発揮する。

(1) 直列コンデンサの電圧補償特性

図 2. 9 は、送電線路に直列コンデンサCを挿入した場合を示している。

このとき、受電端の特性式は次のようになる。

$$Pr^2 + \left(Qr + \frac{Vr^2}{Xl - Xc} \right) = \left(\frac{Vs Vr}{Xl - Xc} \right)^2 \quad (2.5)$$

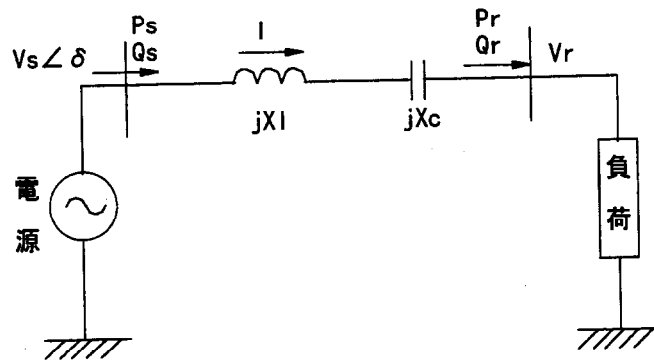


図 2. 9 直列コンデンサを有する系統

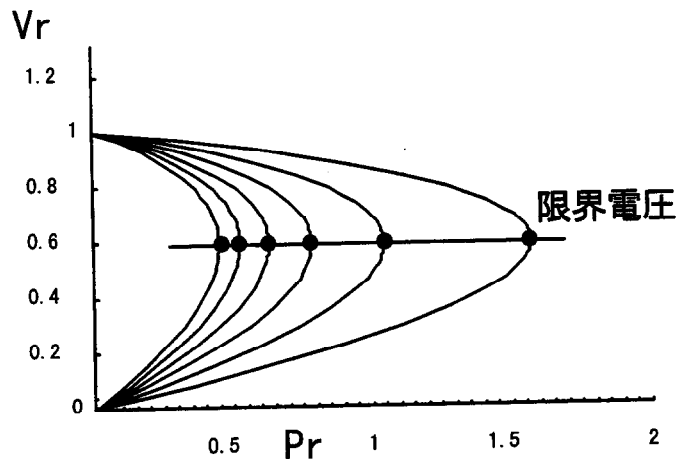


図 2. 10 直列コンデンサにより補償したときのP-V特性曲線

これより、直列コンデンサのインピーダンス X_c をパラメータにしてP-Vカーブを描くと図 2. 10の通りとなる。

この場合も前述の調相用コンデンサと同様に、その投入量を増やすことにより限界電力を増加させることが出来る。更に、このとき、その限界電圧は上昇せず、単に横方向に推移するため、電力用コンデンサによる補償のように、運用電圧が限界電圧に近づいてしまう心配もない。

(2) 直列コンデンサ補償の問題点

以上に示す補償特性において、直列コンデンサのインピーダンスは、定常時の値を用いている。つまり、この補償特性は系統が定常状態にあることを前提にしている。従って、過渡状態では逆に悪影響を及ぼすことがある。

以下にこの問題点をあげる。

[直列コンデンサを用いたときの問題点]

- ① 直コン投入時の過電圧（不揃い投入，負荷時投入）
- ② 分数調波振動（鉄共振）の発生
- ③ 軸ねじれ共振（SSR）の発生
- ④ 同期機の負制動の発生

⑤ 誘導機の自己励磁現象の発生

これらのうちで、①はコンデンサの過渡状態に関する問題であり、これを引き起こさないように運転シーケンスを組んで対応している。また②～⑤は直列コンデンサを挿入したことによって、系統に低周波の共振点が出るために発生する問題である（通常は系統の共振点は、商用周波より高い点にある）。

2. 5 新しい系統電圧補償・改善装置

2. 5. 1 従来技術における問題点

前節で示した様に、従来の電圧改善・補償方式には以下のような問題点がある。

表 2. 1 0 従来の電圧補償方式の問題点

補償装置	問題点
(1) 調相装置 (電力用コンデンサ, 分路リアクトル)	① 電圧調整がステップ状（不連続）に行われる。 → 場合によってはハンチング現象の恐れがある。 ② 調整・制御が遅い。 → 電圧不安定現象，電圧崩壊の恐れがある。 ③ 三相不平衡調整が行えない ④ 電圧降下すると電圧の2乗に比例して容量が低下する。
(2) 直列コンデンサ	① 不揃い投入，負荷時投入により過電圧が発生する。 ② 分数調波振動（鉄共振）や軸ねじれ共振（SSR）の共振が発生する。 ③ その他、同期機，誘導機の異常動作を発生させる ④ 三相不平衡線路補償ができない

同期調相器（RC）は、同期電動機を利用した調相設備の一種である。この場合、表 2. 1 0 に示した（1）の問題を持たない。しかし、同期調相器については、

- ・稼働部があるため保守に手かかる。
- ・騒音・振動対策が必要
- ・短絡容量が増大する
- ・建設費が高い

等の問題のあることが指摘されている。また、これはその同期機の逆相耐量により、三相不平衡補償に適さない。

2. 5. 2 新しい電圧補償装置

電力系統は今後ますます複雑化していくと予想され、その電力品質を保つために、より高性能、高機能な電圧補償装置の要求されることが予想される。

これに対して、前項に示した従来の電圧補償装置の問題を解決できる装置として、電力用半導体を適用した電圧補償装置が実用されるようになってきている。その代表がサイリスタを用いた静止形無効電力補償装置（他励式SVC）であり、既に多くの実績がある。そして最近ではGTOやIGBTなどの自己消弧素子を用いた自励式SVCなど、更に新しい電圧補償装置が実用されるようになってきている。

サイリスタは、原理的に電源半周期に一回の点弧動作しか出来ず、またそれ自身で消弧動作ができないため、これを用いた他励式SVCは制御応答速度に限界があり、機能面でも制約があった。一方、自励式変換器による電圧補償装置は、適用しているデバイスが任意の時点でスイッチング可能であり、特に以下の性能を実現することができる。

- ・高速制御，高速応答
- ・三相不平衡制御
- ・連続調整，連続制御

(1) 基本構成と機能

自励式変換器による電圧補償装置は、任意に出力制御が可能な電圧源（電流源）として機能し、電力系統との接続形態により並列形補償器と直列形補償器の2つに分類することができる。以下それぞれの基本構成と等価回路、及びこれによって実現できる機能を示す。

① 並列形補償器

本装置は、調相装置の一種であり、電力系統に並列に接続される。この等価回路は、図2. 1 1の通り電流源として扱うことが出来る。

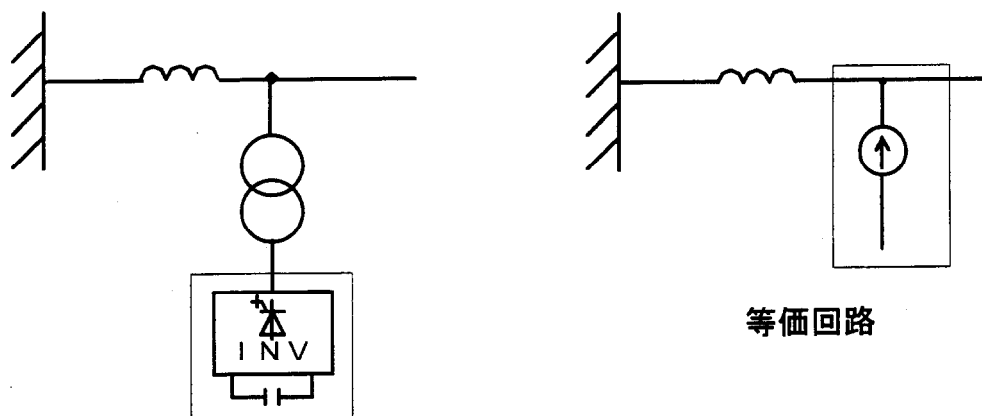


図 2. 1 1 並列形補償器

この特徴は次の通りである。

- ・装置自身で進み、遅れ無効電力の連続制御が可能（電圧の連続調整が可能）
- ・PWM制御により、高速応答が可能（無効電力の過不足に高速追従可能）
- ・PWMと多重構成により高調波の抑制が可能
- ・三相個別制御が可能であり、不平衡補償が可能

以上の特徴を生かすことにより次の装置として使用することが出来る。

- ・高速追従が可能な調相装置
- ・フリッカ補償装置
- ・三相不平衡補償装置

ここで、自励式変換器を用いた並列形電圧補償装置である自励式SVCを、同様に並列形補償装置の他励式SVC（TCR）、同期調相機（RC）と比較する。これらのモデルは図2.12の通りである。これらは、スタコンやシャントリアクトルに対し、いずれも高速・連続に無効電力の調整が行える特長を有するため、能動的並列形補償装置と呼ぶことができる。

- | | |
|--------------|------------|
| ・他励式SVC（TCR） | 定インピーダンス特性 |
| ・自励式SVC | 定電流特性 |
| ・同期調相機（RC） | 定励磁特性 |

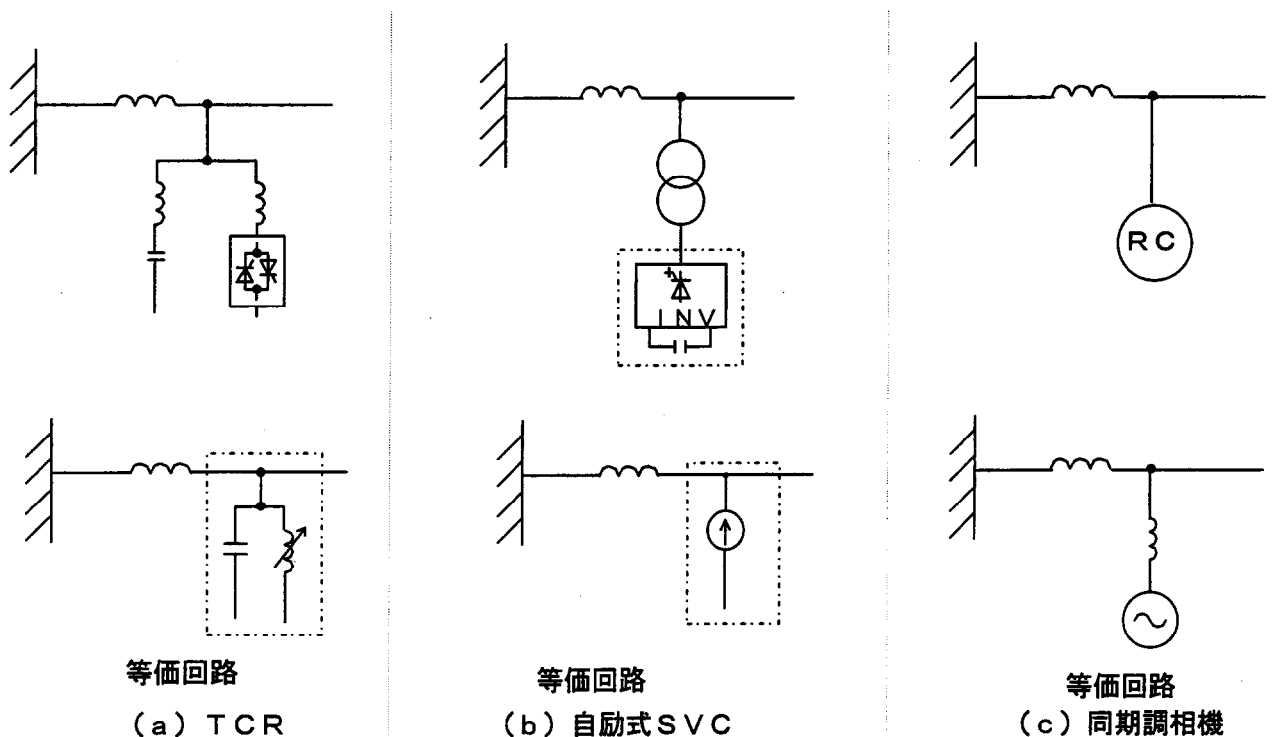


図 2.12 能動的並列形電圧補償装置のモデル

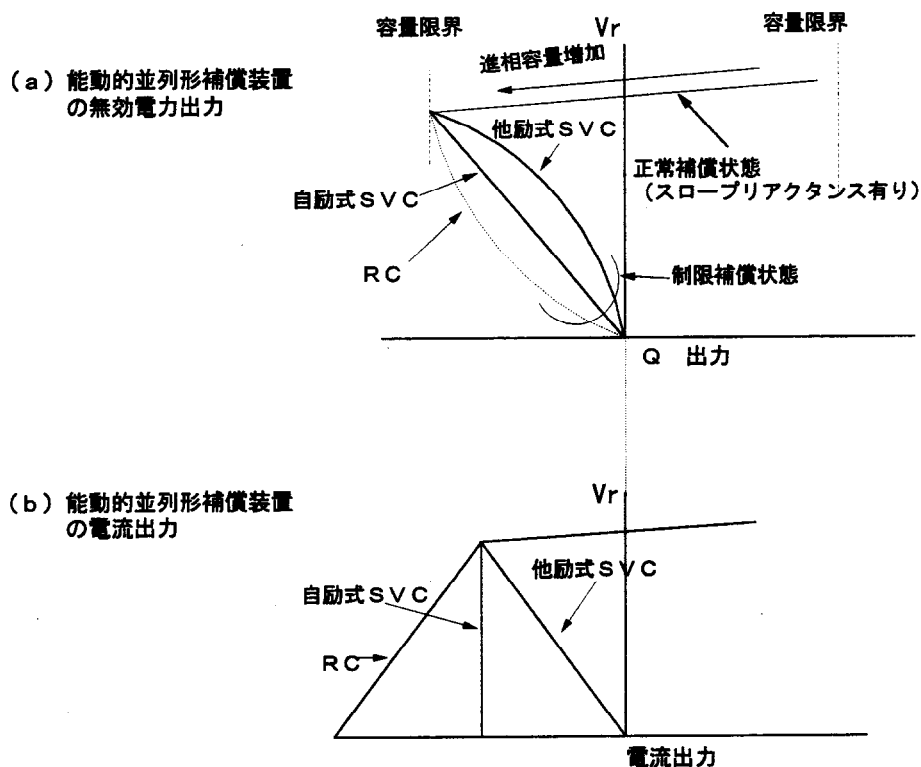


図 2.13 能動的並列形補償装置の出力特性ル

図 2.13 (a) にこれらの無効電力出力特性を示す。装置容量内ではTCR，自励式SVC，RCいずれも同様の出力特性であり，系統電圧に対して所定のスロープを持たせて無効電力を出力する。しかし，その装置容量限界に至ったときには，それぞれで次のように出力特性が異なる。

これによって，系統電圧が通常の補償限界以下に低下すると，無効電力出力容量が同期調相機，自励式SVC，TCRの順で小さな値となり，つまりこの順番で補償能力が減少することになる。この限界状態でのそれぞれの出力電流は，図 2.13 (b) に示すようになる。同期調相機は補償限界を超えてもその補償能力低下が少なくて済むと考えられるが，この場合図 2.13 (b) から分かるように同期調相機の電流が過大となることを前提としている。通常の装置設計ではこの状態は長時間継続させることは困難と考えられ，実際には同期調相機の自励式SVCと同様に定電流特性曲線を描くことになる。

図 2.14 は同期調相機の容量限界モデルを示してゐる。

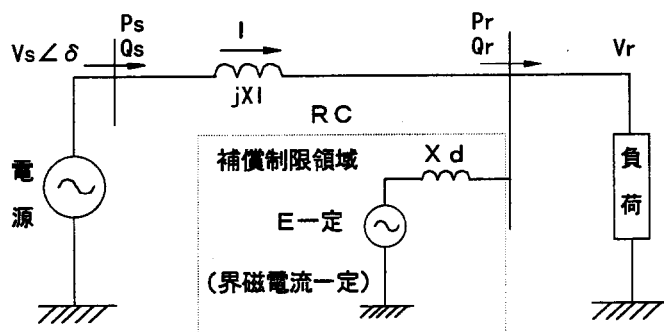


図 2.14 RCの容量限界モデル

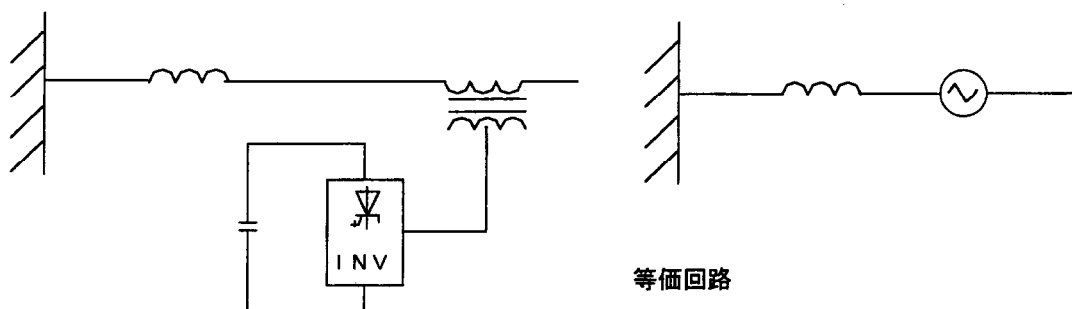


図 2. 15 直列形補償器

② 直列形補償器

図 2. 15 は系統に直列接続されて補償動作を行う直列形補償器を示している。この等価回路は、同図に示すように系統に直列の電圧源で扱うことが出来る。ここでこの電圧を、系統電流と常時直交位相として出力すれば、インダクタンス成分からキャパシタンス成分まで任意の大きさのリアクタンスとして機能することが出来る。

この特徴は次の通りである。

- ・装置自身で正負連続的に等価インピーダンスを調整することが可能
- ・従って、系統の固有共振点を作らない。
- ・Lとして動作することにより短絡容量を低減することができる。
- ・三相不平衡是正ができる。
- ・インバータ直流回路に電圧源を設けることにより系統電圧の位相と振幅を直接調整できる。

(2) 特徴の比較

表 2. 11 と表 2. 12 に従来の補償装置と新しい補償装置の特徴を比較して示す。

これらの表より、自励式変換器を用いた補償装置は、高性能、高機能な補償装置として三相不平衡補償や高速応答性能が要求される電圧動揺（フリッカ）の補償など、新しい電圧補償装置の分野へ適用できると言える。この自励式変換器による補償装置は、調相用コンデンサなど従来の補償機器に比べてコスト面ではまだまだ不利な状況であり、前述の従来補償装置では実現できない特徴を積極的に活かすことが、本補償装置の要件となる。

表 2.1.1 並列形補償装置の特徴比較

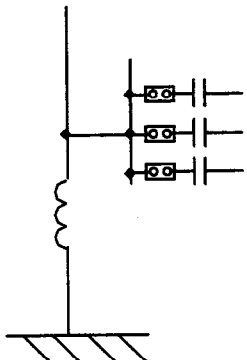
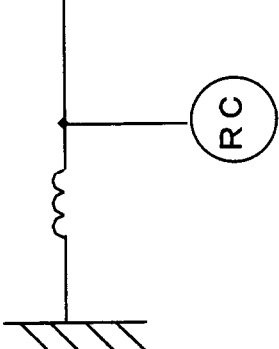
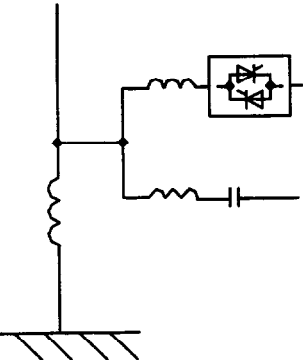
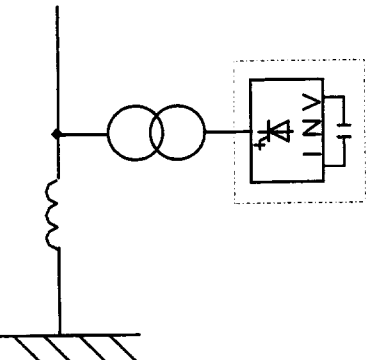
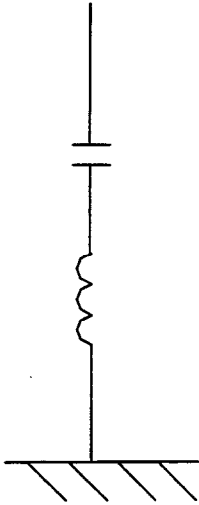
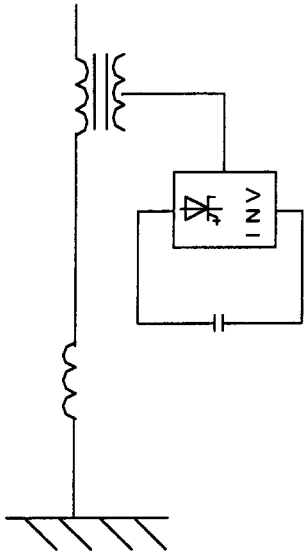
	電力用コンデンサ (SC)	同期調相機 (RC)	無効電力補償装置 (SVC)	自励式 SVC
構 成				
調整, 制御	不連続	連 続	連 続	連 続
応答速度	200~500ms	100~200ms (制御)	40~60ms	数ms~20ms
三相不平衡補償	不 可	不 可	可	可
その他の特徴	構成シンプル, 安価 高調波発生無し	稼働部あり, 保守要 振動, 騒音対策要 短絡容量増大 高調波発生無し 建設費高	高調波発生大 対策要 建設費高	高調波発生有り 対策易 建設費高

表 2.12 直列形補償装置の特徴比較

	直列コンデンサ (S r C)	自励式可変リアクタンス装置
構 成		
インピーダンス調整	不 可	連続調整可
共振現象	発 生	な し
三相不平衡線路補償	不 可	可
負荷時投入（起動）	不 可	可
その他の特徴		短絡容量低減可

2. 6 まとめ

本章では電力系統の電圧に関する問題とその原因について述べた。そしてこの電圧問題に対する現状の対策方式とその問題点を示した。さらにその問題点を解決できる自励式変換器による新しい電圧補償装置について述べた。以下に本章のまとめを示す。

(1) 電力系統の電圧に関する問題として以下の項目を挙げ、これらの様相，原因，機器への影響，および現状の規制値／許容値について総括して述べた。

- ・電圧変動
- ・電圧動揺
- ・三相不平衡
- ・その他 瞬時電圧低下，高調波

(2) 上記に対し、現状以下の機器で対策していることを述べ、それぞれの特徴を示した。

- ・発電器AVR
- ・送電線路強化
- ・負荷時タップ切替装置（OLTC）
- ・調相設備
- ・直列コンデンサ

(3) 上記、現状の対策の中で、中心的役割を果たす調相設備と直列コンデンサの補償特性と問題点を明確にし、特に以下が問題となることを示した。

- ・連続調整ができない → ステップ状の電圧調整（ハンチングの恐れ）
- ・応答が遅い → 電圧不安定現象，電圧崩壊の恐れ
- ・不平衡補償ができない
- ・直列コンデンサにおける低周波共振現象の発生

(4) 以上に示す従来の補償装置の持つ課題を解決し、系統制御の高性能化をもたらす装置として、自励式変換器を用いた新しい電圧補償装置について述べ、これが任意の出力制御が可能な電圧源又は電流源として機能し、電力系統との接続形態により、並列形補償と直列形補償に分類できることを示した。。

(5) 上記の新しい補償装置の特徴を現状の補償装置と比較し、この自励式変換器を用いた新しい補償装置が、三相不平衡補償装置や高速応答の要求されるフリッカ補償装置及び可変インピーダンス補償装置など新しい分野に適用できることを示した。

第 3 章

系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

3. 1 まえがき

第2章において、電力系統の電圧に関する諸問題を示し、その改善方式として調相設備や直列コンデンサなど従来の補償方式と共に、パワーエレクトロニクスによる新しい能動的な電圧補償方式を述べた。この能動的電圧補償装置は、原理的に系統に直列接続されて動作する直列形補償器と系統に並列接続される並列形補償器に大別される。本章では、これら直列形補償器と並列形補償器に着目し、これらの電圧補償特性を、種々の系統条件に対して解析的に求め、それぞれの補償特性を比較検討する。そして、これら補償器の基本的な適用性について示す。

3. 2 下位側負荷に起因する電圧変動補償

3. 2. 1 解析モデル

ここでは、電圧変動が電圧補償点（箇所）よりも下位側にある負荷によって発生する場合について検討する。このとき、負荷は電圧変動が最も顕著に現れるケースとして、リアクトル負荷を想定する。この解析モデルを図 3. 1 に示す。

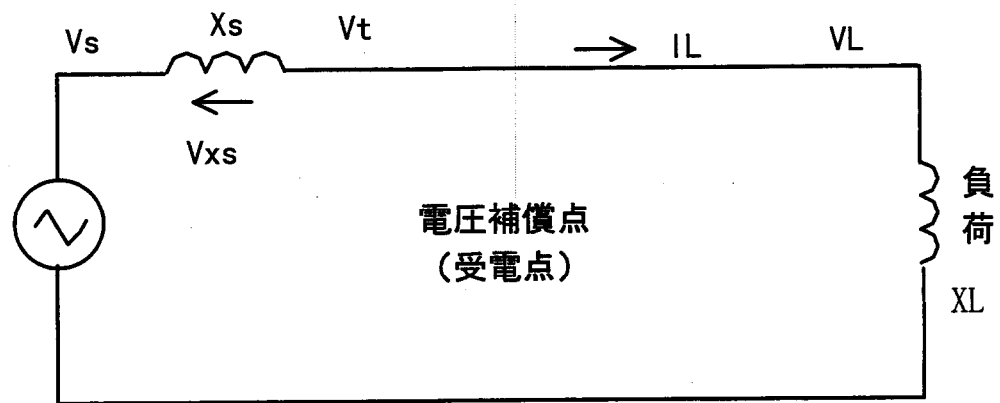


図 3. 1 下位側に遅れ負荷が存在する電力系統モデル

この系統では、系統の線路インピーダンス X_s により、電圧降下が生ずる。この時、負荷電圧 V_L （=受電端電圧 V_t ）は下式で表される。

$$V_L = \frac{X_L}{X_s + X_L} V_s \quad (3.1)$$

例えば、各部のインピーダンスを、

$$X_L = 1.0 \text{ pu} \quad X_S = 0.2 \text{ pu}$$

とすると、負荷電圧は

$$\dot{V}_L = 0.83 \dot{V}_S$$

つまり、系統電圧の約83%に降下することになる。

3.2.2 直列補償特性

上記の電力系統モデルに対して、直列形補償器を用いて受電端電圧を補償する。この補償は、図3.2に示すとおり、直列形補償器をコンデンサ動作させることにより行う。これは、直列形補償器の出力電圧を系統電流（負荷電流） I_L に対して直交遅れ位相とし、その振幅を線路インピーダンス X_S で降下する値とすれば良い。

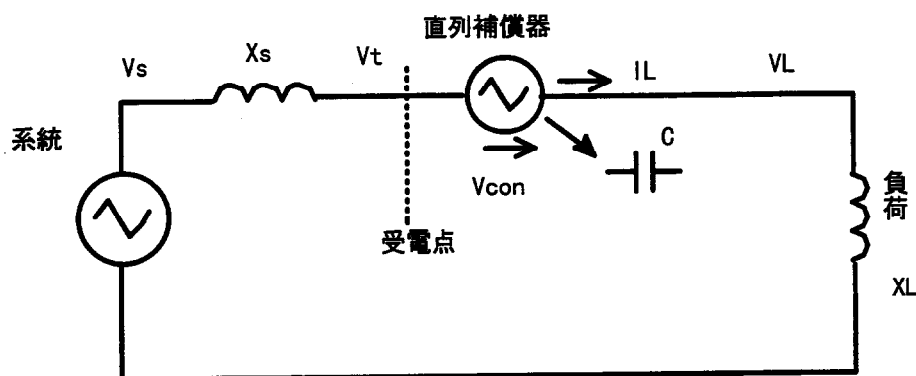


図 3.2 下位側負荷に起因した電圧変動に対する直列補償モデル

図3.2のモデルをもとに直列補償の電圧補償特性式を導く。（ここでは、後の式の展開の都合上補償電圧 V_{CON} の正の向きを図の方向にとる。）

図3.2より以下の関係式が求まる。

$$\dot{V}_L = \dot{V}_S - jX_S \dot{I}_L + \dot{V}_{CON} \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{V}_L}{jX_L} \quad (3.3)$$

$$\therefore \dot{V}_L = \frac{X_L}{X_L + X_S} (\dot{V}_S + \dot{V}_{CON}) \quad (3.4)$$

ここで k ($0 \leq k \leq 1$) を補償率として、補償電圧 V_{CON} を以下と定義する。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{CON} &= k j X_S \dot{I}_S \\ &= k \frac{X_S}{X_L} \dot{V}_L \quad (0 \leq k \leq 1) \end{aligned} \quad (3.5)$$

このとき、下式が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_L &= \frac{X_L}{X_L + X_S} \left(\dot{V}_S + k \frac{X_S}{X_L} \dot{V}_L \right) \\ &= \frac{X_L}{X_L + X_S(1-k)} \dot{V}_S\end{aligned}\quad (3.6)$$

さらに、受電端電圧 V_t は

$$\begin{aligned}\dot{V}_t &= \dot{V}_S - jX_S \dot{I}_L \\ &= \left(1 - \frac{X_S}{X_L} \frac{X_L}{X_L + X_S(1-k)} \right) \dot{V}_S\end{aligned}\quad (3.7)$$

が得られる。

ここで、

$$X_L = 1.0 \text{ pu} \quad X_S = 0.2 \text{ pu}$$

と仮定し、補償率 k ($0 \sim 1$) を横軸として、負荷電圧 V_L と受電端電圧 V_t を系統母線電圧 V_S で規格化して示すと、図 3.3 となる。

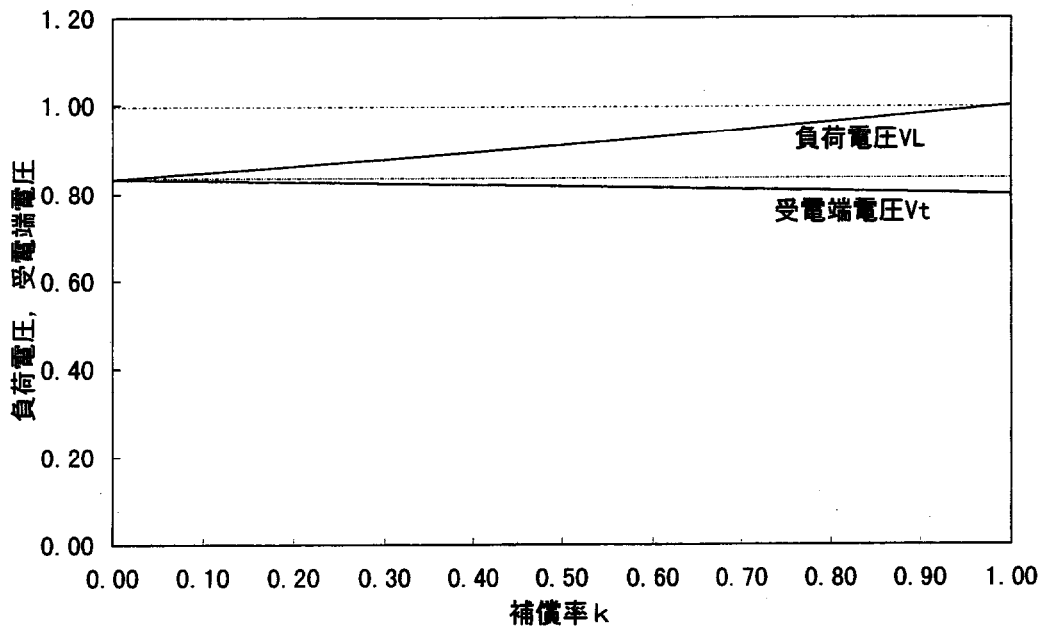


図 3.3 下位側負荷による電圧変動に対する直列補償特性

更に、直列形補償器の装置容量は次式により得られる。

$$\begin{aligned}S &= |\dot{V}_{CON}| \cdot |\dot{I}_L| \\ &= \left| k \frac{X_S}{X_L} \dot{V}_L \right| \cdot \left| \frac{\dot{V}_L}{X_L} \right| \\ &= k \frac{X_S}{X_L} \cdot \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_S(1-k)} \right\}^2 \cdot \frac{V_S^2}{X_L}\end{aligned}\quad (3.8)$$

これより、補償率 k ($0 \sim 1$) に対して、装置容量 S を負荷容量 V_S^2/X_L で規格化して示

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

すと、図 3. 4となる。

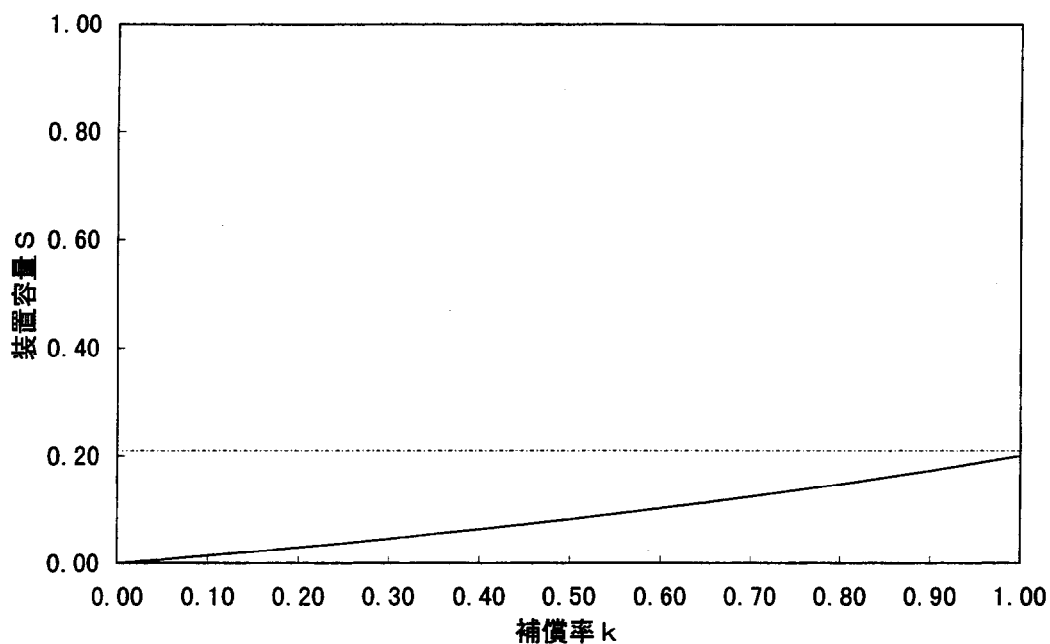


図 3. 4 下位側負荷に対する直列形補償器の装置容量

3. 2. 3 並列補償特性

下位側負荷に対する並列補償の等価回路を図 3. 5に示す。

この場合の補償は、負荷の無効電流（この場合は全負荷電流となる）を検出し、並列形補償器よりこの無効電流と同位相の電流を系統に注入することで行う。

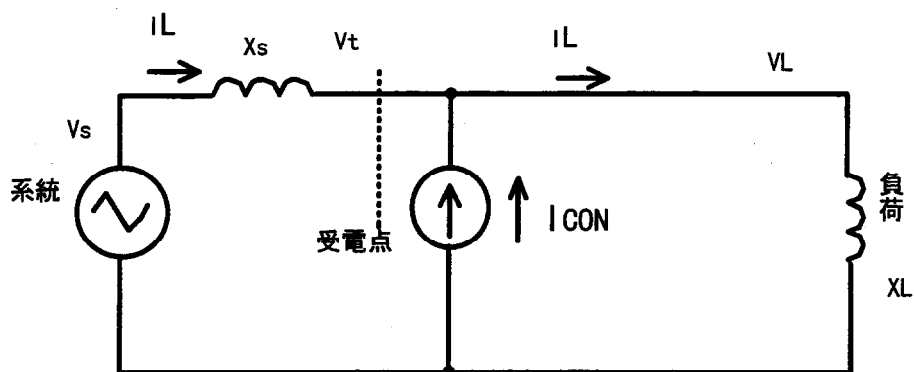


図 3. 5 下位側負荷に起因した電圧変動に対する並列補償モデル

関係式は以下の通りとなる。

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{V}_L}{jX_L} \quad (3.9)$$

$$\dot{I}_S + \dot{I}_{CON} = \dot{I}_L \quad (3.10)$$

並列補償器の出力電流（補償電流） I_{CON} を以下のように定義する。

$$\dot{I}_{CON} = k\dot{I}_L \quad (3.11)$$

$$\therefore \dot{I}_S = (1-k)\dot{I}_L \quad (3.12)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \dot{V}_S - jX_S \dot{I}_S \\ &= \dot{V}_S - \frac{X_S}{X_L} (1-k) \dot{V}_L \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\therefore \dot{V}_L = \frac{X_L}{X_L + X_S(1-k)} \dot{V}_S \quad (3.14)$$

となる。

また、この並列補償の場合には

$$V_L = V_t$$

の関係にある。

以上より、前項と同様に

$$X_L = 1.0 \text{ pu} \quad X_S = 0.2 \text{ pu}$$

として、補償率 k （0～1）を横軸として、負荷電圧 V_L と受電端電圧 V_t を系統母線電圧 V_S で規格化して示すと、図 3. 6 となる。

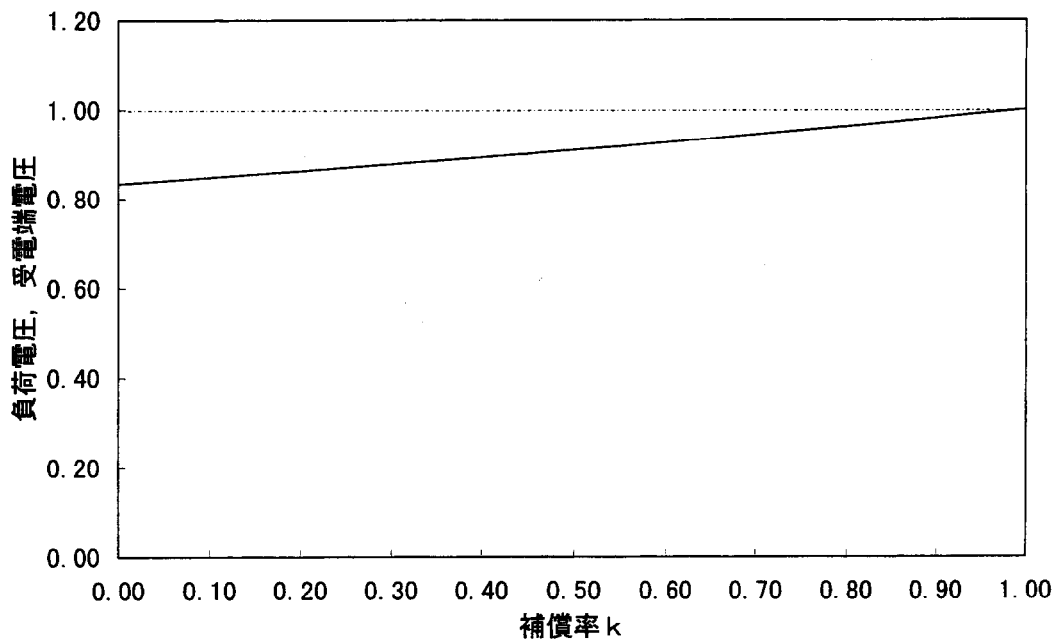


図 3. 6 下位側負荷による電圧変動に対する並列補償特性

更に、並列補償器の装置容量としては下記が得られる。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

$$\begin{aligned}
 S &= |\dot{I}_{CON}| \cdot |\dot{V}_L| \\
 &= |k \dot{I}_L| \cdot |\dot{V}_L| \\
 &= k \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_S(1-k)} \right\}^2 \frac{V_S^2}{X_L}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

これより、補償率 k （0～1）に対して、装置容量 S を負荷容量 V_S^2/X_L で規格化して示すと、図 3. 7となる。

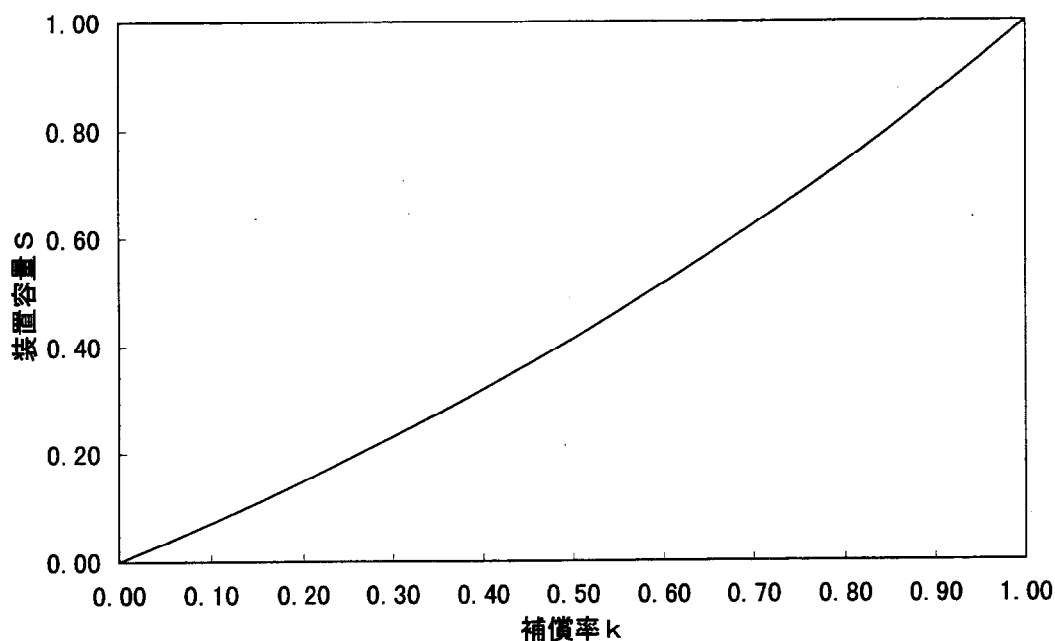


図 3. 7 下位側負荷に対する並列形補償器の装置容量

3. 3 上位側負荷に起因する電圧変動補償

3. 3. 1 解析モデル

図 3. 8は、上位系統の負荷 X_M によって受電端電圧 $V_t(V_L)$ が変動する系統のモデルを示している。ここでは、簡単のために下位側負荷は零とする。

この系統に対して、直列補償と並列補償それぞれの電圧補償特性を求める。

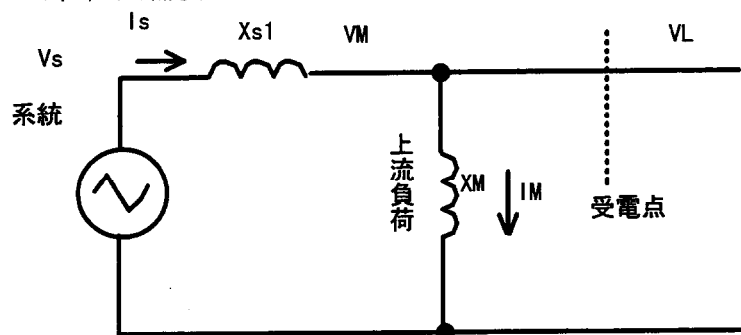


図 3. 8 上位側に遅れ負荷が存在する電力系統モデル

3.3.2 直列補償特性

図 3.9 の直列補償モデルにおいて、下式の関係が成り立つ。

$$\dot{V}_M = \dot{V}_t = \frac{X_M}{X_{S1} + X_M} \dot{V}_S \quad (3.16)$$

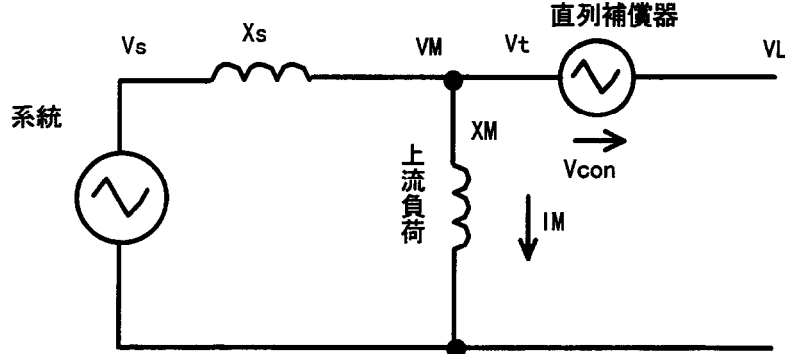


図 3.9 系統上位側負荷に起因した電圧変動に対する直列補償モデル

(3.5)式と同様に k ($0 \leq k \leq 1$) を補償率として、補償電圧 V_{CON} を以下と定義する。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{CON} &= k j X_S \dot{I}_S \\ &= k \frac{X_S}{X_S + X_M} \dot{V}_S \quad (0 \leq k \leq 1) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$\therefore$

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \dot{V}_t + \dot{V}_{CON} \\ &= \left(\frac{X_M}{X_S + X_M} + \frac{k X_S}{X_S + X_M} \right) \dot{V}_S \\ &= \frac{X_M + k X_S}{X_S + X_M} \dot{V}_S \end{aligned} \quad (3.18)$$

ここで、下位側負荷 X_L を 1pu とし、上位負荷 X_M とその負荷の上位側系統のインピーダンス X_S を以下と仮定する。

$$X_M = 0.5 \quad X_S = 0.1 \quad (\text{負荷を 1pu とする})$$

以上より、補償率 k ($0 \sim 1$) を横軸として、負荷電圧 V_L と受電端電圧 V_t を系統母線電圧 V_S で規格化して示すと、図 3.10 となる。

また、装置容量は、下式で表される

$$\begin{aligned} S &= |\dot{V}_{CON}| \cdot |\dot{I}_L| \\ &= \left| k \frac{X_S}{X_S + X_M} \dot{V}_S \right| \cdot \left| \frac{\dot{V}_S}{X_L} \right| \\ &= k \frac{X_S}{X_S + X_M} \cdot \frac{V_S^2}{X_L} \end{aligned} \quad (3.19)$$

これより、補償率 k ($0 \sim 1$) に対して、装置容量 S を負荷容量 V_S^2/X_L で規格化して示すと、図 3.11 となる。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

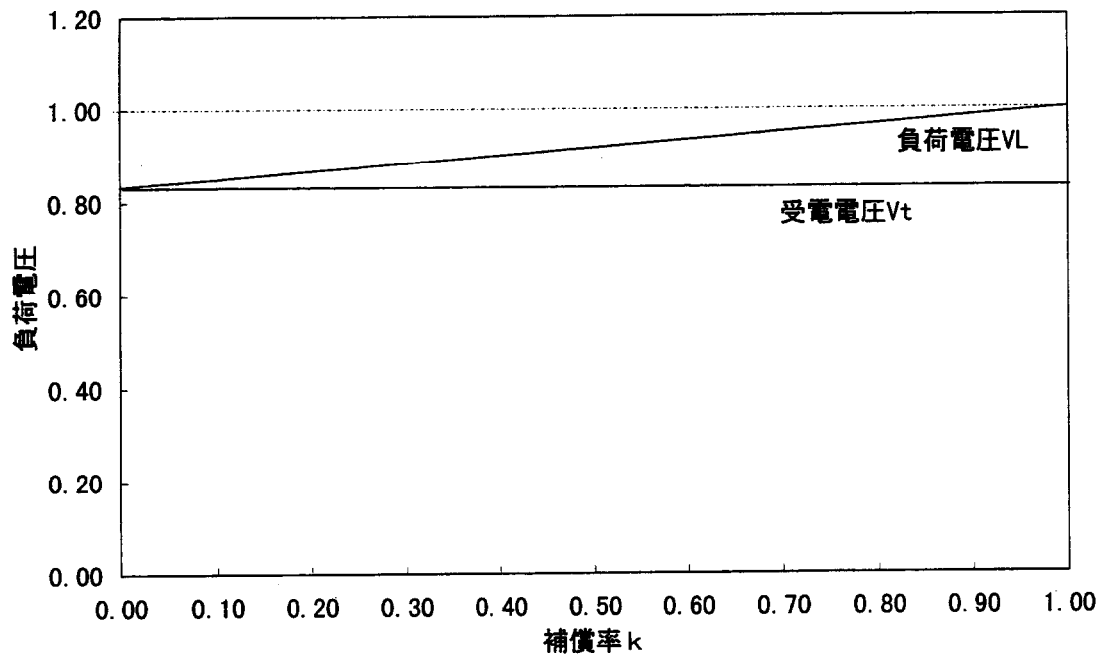


図 3.10 上位側負荷による電圧変動に対する直列補償特性

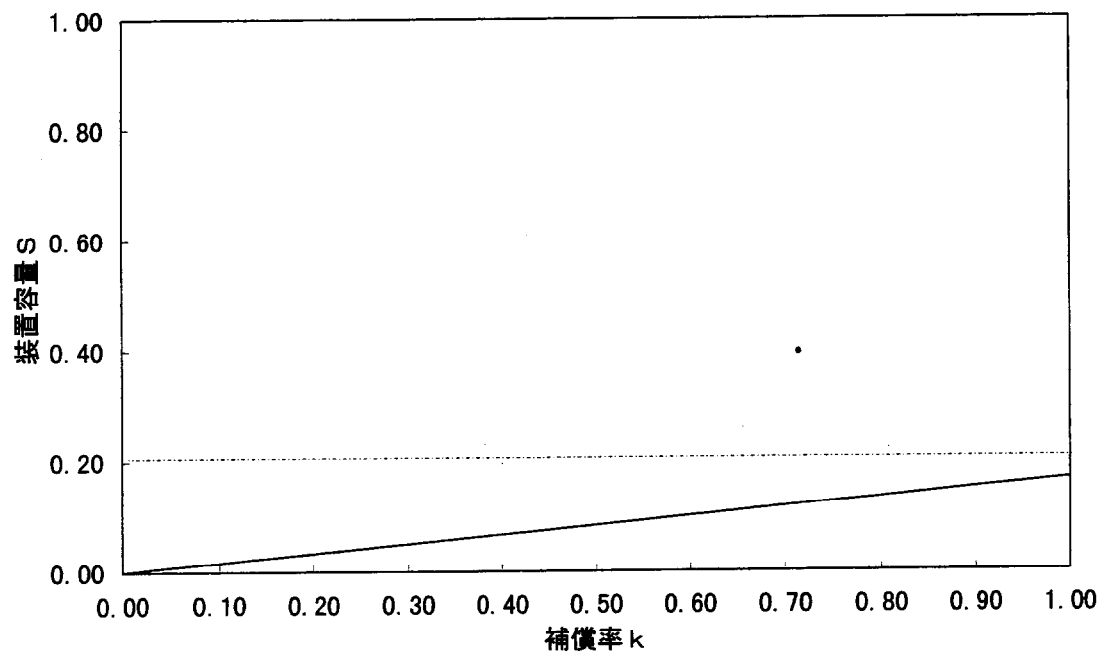


図 3.11 上位側負荷に対する直列形補償器の容量

3.3.3 並列補償特性

図 3.12 の並列補償モデルの等価回路を図 3.12 に示す。ここでは、まず並列形補償器から上位側の負荷までの線路インピーダンスが無視できる場合を考えている。

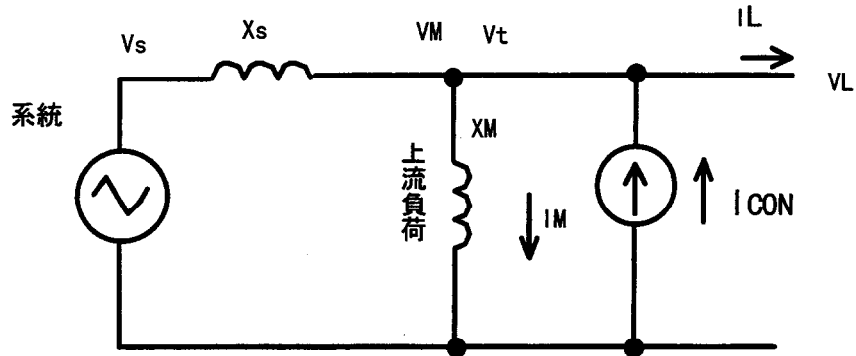


図 3. 1 2 系統上位側負荷に起因した電圧変動に対する並列補償モデル

なお、上位側負荷電流を検出できない場合には、系統電圧から系統に注入すべき無効電流を求めて制御を行うものとする。

特性式を以下に示す。

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{V}_M}{jX_M} \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_S + \dot{I}_{CON} = \dot{I}_M \quad (3.21)$$

並列補償器の出力電流 I_{CON} を以下のように定義する。

$$\dot{I}_{CON} = k\dot{I}_M \quad (3.22)$$

$$\therefore \dot{I}_S = (1-k)\dot{I}_M \quad (3.23)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \dot{V}_M = \dot{V}_t &= \dot{V}_S - jX_S \dot{I}_S \\ &= \dot{V}_S - \frac{X_S}{X_M} (1-k) \dot{V}_M \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\therefore \dot{V}_M = \frac{X_M}{X_M + X_S(1-k)} \dot{V}_S = \dot{V}_L \quad (3.25)$$

となる。

ここで各定数を以下とする。

$$X_M = 0.5 \quad X_S = 0.1 \quad (\text{負荷 } X_L \text{ を } 1\text{pu とする})$$

以上より、補償率 K ($0 \sim 1$) を横軸として、負荷電圧 V_L と受電端電圧 V_t を系統母線電圧 V_S で規格化して示すと、図 3. 1 3となる。

そして、並列補償器の装置容量としては下記が得られる。

$$\begin{aligned} S &= |\dot{I}_{CON}| \cdot |\dot{V}_L| \\ &= |k\dot{I}_M| \cdot |\dot{V}_M| \\ &= k \left\{ \frac{X_M}{X_M + X_S(1-k)} \right\}^2 \frac{V_S^2}{X_M} \end{aligned} \quad (3.26)$$

これより、補償率 K ($0 \sim 1$) に対して、装置容量 S を負荷容量 V_S^2/X_L で規格化して示すと、図 3. 1 4となる。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

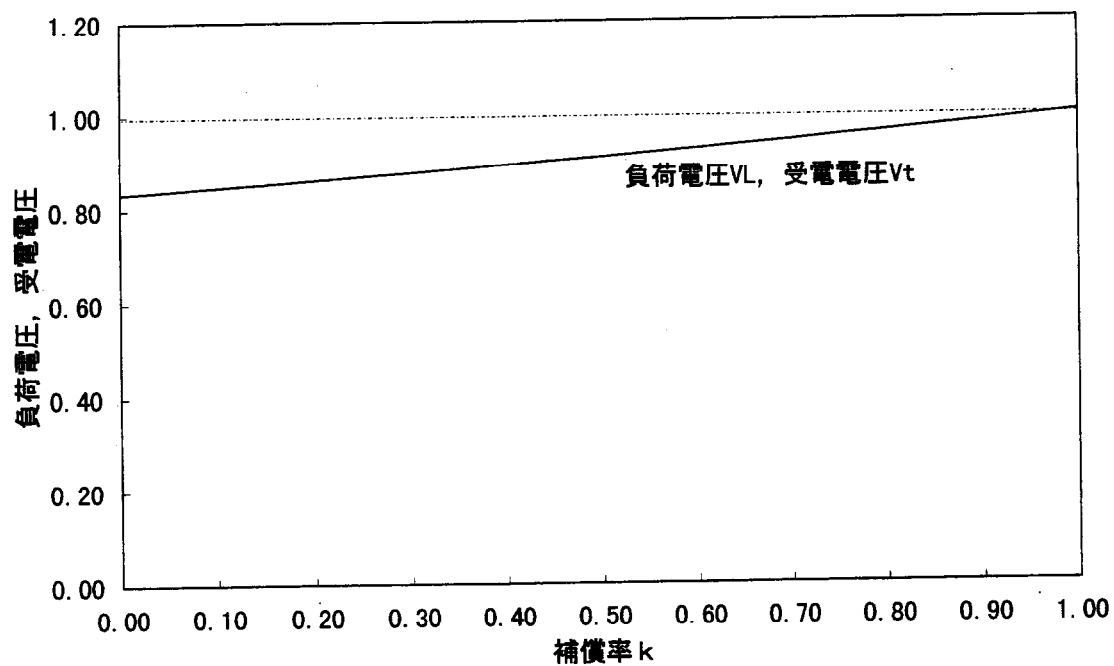


図 3. 1 3 上位側負荷による電圧変動に対する並列補償特性

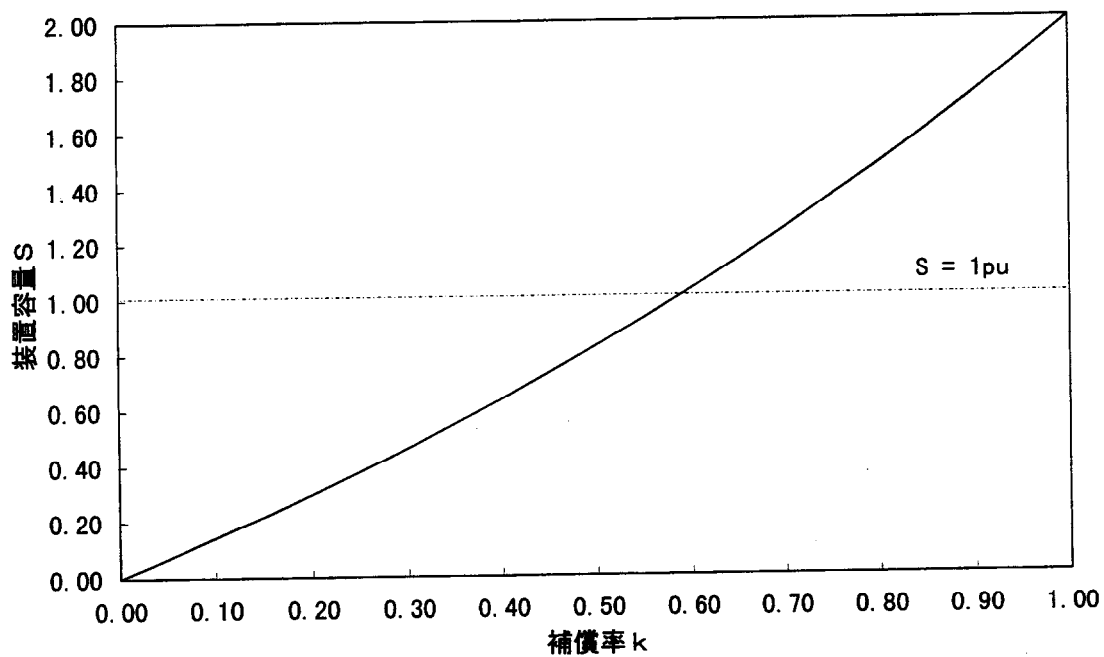


図 3. 1 4 上位側負荷に対する並列形補償器容量

次に、解析モデルとして図 3. 1 5 に示すように、補償器設置点から上位側負荷までの線路インピーダンスを考慮した場合の特性式を求める。

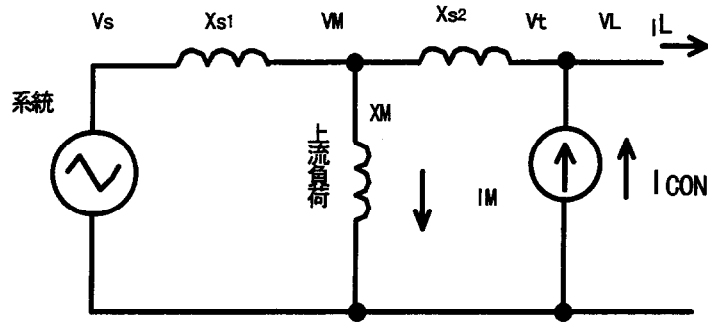


図 3. 1 5 上位側負荷に対する並列補償モデル
(上位側負荷までの線路インピーダンスを考慮した場合)

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{V}_M}{jX_M} \quad (3.27)$$

$$\dot{I}_S + \dot{I}_{CON} = \dot{I}_M \quad (3.28)$$

並列形補償器の出力電流 I_{CON} を以下のように定義する。

$$\dot{I}_{CON} = k\dot{I}_M \quad (3.29)$$

$$\therefore \dot{I}_S = (1-k)\dot{I}_M \quad (3.30)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \dot{V}_M &= \dot{V}_S - jX_{S1}\dot{I}_S \\ &= \dot{V}_S - \frac{X_{S1}}{X_M}(1-k)\dot{V}_M \\ \therefore \dot{V}_M &= \frac{X_M}{X_M + X_{S1}(1-k)}\dot{V}_S \end{aligned} \quad (3.31)$$

となる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \dot{V}_M + jX_{S2}k\dot{I}_M \\ &= \dot{V}_M + \frac{X_{S2}}{X_M}k\dot{V}_M \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\therefore \dot{V}_L = \frac{X_M + kX_{S2}}{X_M + (1-k)X_{S1}}\dot{V}_S \quad (3.33)$$

となる。

また、並列補償器の装置容量としては下記が得られる。

$$\begin{aligned} S &= |\dot{I}_{CON}| \cdot |\dot{V}_L| \\ &= \left| k \frac{\dot{V}_M}{X_M} \right| \cdot \left| \frac{X_M + kX_{S2}}{X_M + (1-k)X_{S1}} \cdot \dot{V}_S \right| \\ &= \frac{kX_M(X_M + kX_{S2})}{\{X_M + (1-k)X_{S1}\}^2} \cdot \frac{V_S^2}{X_M} \end{aligned} \quad (3.34)$$

3. 4 下位側不平衡負荷に起因する3相不平衡電圧補償

3. 4. 1 解析モデル

図3. 16に、解析の対象とする単相リアクトル負荷が接続された系統モデルを示す。
この系統では、単相負荷としてリアクトルがa－b相間に接続されている。

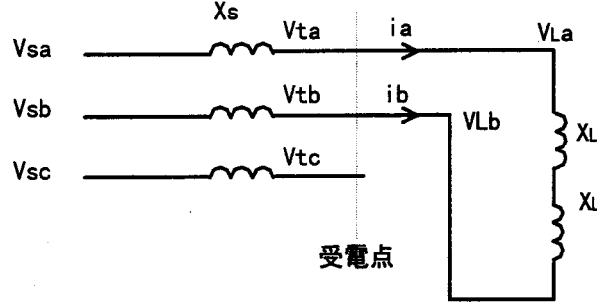


図 3. 16 不平衡（単相）負荷存在する電力系統モデル

負荷電圧は以下の通りとなる。

$$\dot{V}_s(ab) = \dot{V}_{sa} - \dot{V}_{sb} \quad \dot{V}_L(ab) = \dot{V}_{La} - \dot{V}_{Lb} \quad (3.35)$$

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{V}_L(ab)}{j2X_L} \quad (3.36)$$

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_a \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_L(ab) &= \dot{V}_s(ab) - jX_s \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_b \\ &= \dot{V}_s(ab) - 2jX_s \dot{I}_a \end{aligned} \quad (3.38)$$

以上より、

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{V}_s(ab)}{j2(X_L + X_s)} \quad (3.39)$$

$$\dot{V}_L(ab) = \left(1 - \frac{X_s}{X_L + X_s}\right) \dot{V}_s(ab) \quad (3.40)$$

更に、

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - \frac{X_s}{2(X_L + X_s)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.41)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} + \frac{X_s}{2(X_L + X_s)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.42)$$

$$\dot{V}_{Lc} = \dot{V}_{sc} \quad (3.43)$$

が得られる。これより負荷 X_L と系統インピーダンス X_s に応じて、負荷電圧が3相不

平衡となることが分かる。

3. 4. 2 直列補償特性

直列形補償器で不平衡電圧補償を行う場合、次の特性となる。

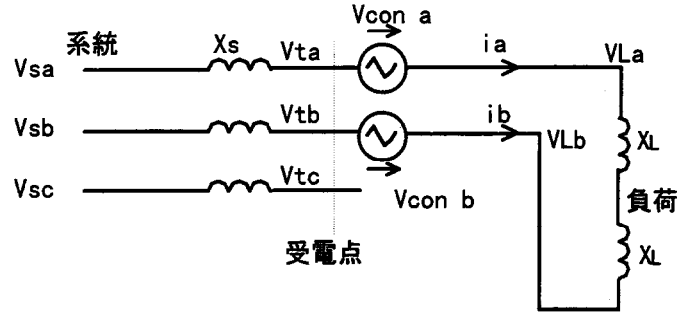


図 3. 1 7 三相不平衡電圧に対する直列補償モデル

$$\dot{V}_s(ab) = \dot{V}_{sa} - \dot{V}_{sb} \quad \dot{V}_L(ab) = \dot{V}_{La} - \dot{V}_{Lb} \quad (3.44)$$

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{V}_L(ab)}{j2X_L} = -\dot{I}_b \quad (3.45)$$

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_{CONa} \quad (3.46)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} - jX_s \dot{I}_b + \dot{V}_{CONb} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_L(ab) &= \dot{V}_{La} - \dot{V}_{Lb} \\ &= \dot{V}_s(ab) - 2jX_s \dot{I}_a + (\dot{V}_{CONa} - \dot{V}_{CONb}) \end{aligned} \quad (3.48)$$

ここで k ($0 \leq k \leq 1$) を補償率として、補償電圧 $\dot{V}_{CONa}$, $\dot{V}_{CONb}$ を以下で定義する。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{CONa} &= k jX_s \dot{I}_a \\ &= k \frac{X_s}{2X_L} \dot{V}_L(ab) \\ &= -\dot{V}_{CONb} \end{aligned} \quad (3.49)$$

以上より、

$$\dot{V}_L(ab) = \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.50)$$

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - \frac{X_s}{2X_L} (1-k) \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.51)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} + \frac{X_s}{2X_L} (1-k) \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.52)$$

同様に

$$\dot{V}_{ta} = \dot{V}_{sa} - \frac{X_s}{2X_L} \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.53)$$

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

$$\dot{V}_{tb} = \dot{V}_{sb} + \frac{X_s}{2X_L} \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.54)$$

$$\dot{V}_t(ab) = \dot{V}_{ta} - \dot{V}_{tb} = \left\{ 1 - \frac{X_s}{X_L} \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \right\} \dot{V}_s(ab) \quad (3.55)$$

が得られる。

ここで各定数を以下とし、

$$X_L = 1.0 \quad X_s = 0.2$$

補償率 k ($0 \sim 1$) を横軸として、電圧が最も大きく変化する $a-b$ 相の負荷電圧 $V_L(ab)$ と受電端電圧 $V_t(ab)$ をそれぞれ系統母線線間電圧 $V_s(ab)$ で規格化して示すと、

図3. 18となる。

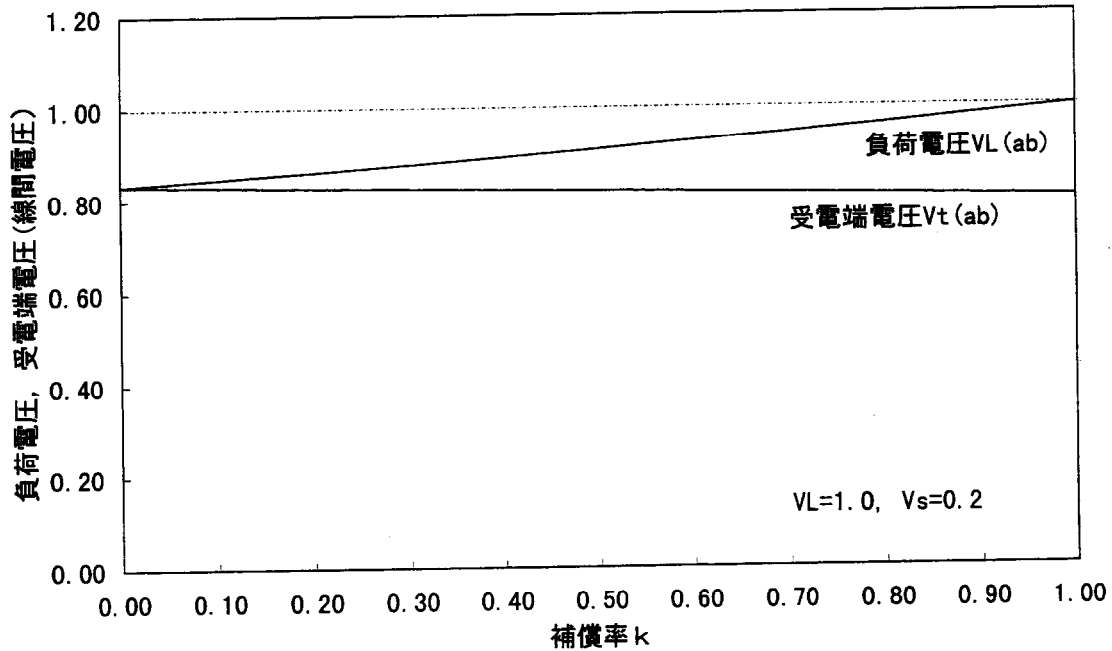


図 3. 18 三相不平衡電圧に対する直列補償特性

更に、このときの補償容量を求めると以下になる。

$$\begin{aligned} S &= |\dot{V}_{CONa}| \cdot |I_a| + |\dot{V}_{CONb}| \cdot |I_b| \\ &= 2 \left| k \frac{X_s}{2X_L} \dot{V}_L(ab) \right| \cdot \left| \frac{\dot{V}_L(ab)}{j2X_L} \right| \\ &= k \frac{X_s}{X_L} \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \right\}^2 \frac{V_s(ab)^2}{2X_L} \end{aligned} \quad (3.56)$$

これより補償率 k ($0 \sim 1$) に対して

$$X_L = 1.0 \quad X_s = 0.2$$

として装置容量を負荷容量 $V_s(ab)^2 / 2X_L$ で規格化して示すと図3. 19となる。

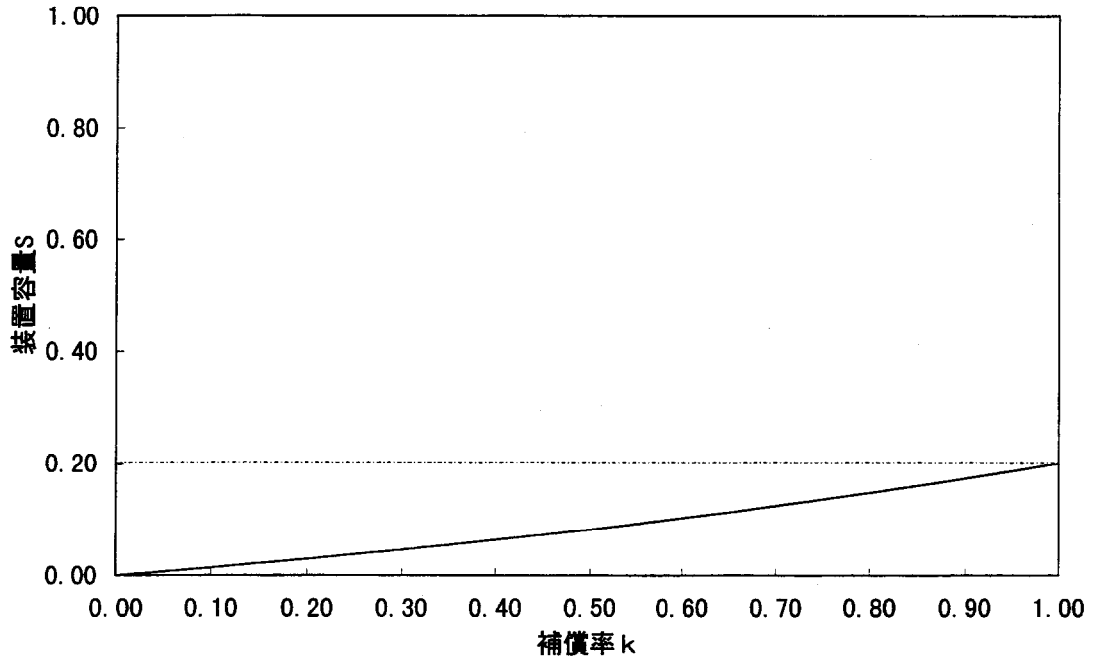


図 3. 1 9 三相不平衡電圧に対する直列形補償器の装置容量

次に不平衡率を導出する。

不平衡率 R_{UB} は下記で定義される。

$$R_{UB} = \left| \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right| \quad (3.57)$$

R_{UB} : 不平衡率 $V1$: 正相電圧 $V2$: 逆相電圧

まず、負荷電圧の正相／逆相電圧は、下式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{L1} \\ \dot{V}_{L2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & A & A^2 \\ 1 & A^2 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{La} \\ \dot{V}_{Lb} \\ \dot{V}_{Lc} \end{bmatrix} \quad \left(A = \epsilon^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad (3.58)$$

ここで、 V_{L1} : 負荷正相電圧 V_{L2} : 負荷逆相電圧

式(3.51), (3.52)より

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - \alpha \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.59)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} + \alpha \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.60)$$

$$\dot{V}_{Lc} = \dot{V}_{sc} \quad (3.61)$$

$$\text{ここで、} \alpha = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \quad (3.62)$$

従って、

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

$$\begin{aligned}\dot{V}_{L1} &= \frac{1}{3} \left\{ \dot{V}_{sa} - \alpha \dot{V}_{s(ab)} + A(\dot{V}_{sb} + \alpha \dot{V}_{s(ab)}) + A^2 \dot{V}_{sc} \right\} \\ &= \frac{1}{3} \left\{ (\dot{V}_{sa} + A \dot{V}_{sb} + A^2 \dot{V}_{sc}) + \alpha(A-1) \dot{V}_{s(ab)} \right\}\end{aligned}\quad (3.63)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{L2} &= \frac{1}{3} \left\{ \dot{V}_{sa} - \alpha \dot{V}_{s(ab)} + A^2(\dot{V}_{sb} + \alpha \dot{V}_{s(ab)}) + A \dot{V}_{sc} \right\} \\ &= \frac{1}{3} \left\{ (\dot{V}_{sa} + A^2 \dot{V}_{sb} + A \dot{V}_{sc}) + \alpha(A^2-1) \dot{V}_{s(ab)} \right\}\end{aligned}\quad (3.64)$$

ここで、

$$\dot{V}_{sb} = A^2 \dot{V}_{sa} \quad \dot{V}_{sc} = A \dot{V}_{sa} \quad \dot{V}_{s(ab)} = \dot{V}_{sa} - \dot{V}_{sb} = (1 - A^2) \dot{V}_{sa} \quad (3.65)$$

であることから、式(3.62) 及び式(3.63)は、以下のように整理できる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_{L1} &= \frac{1}{3} (3 \dot{V}_{sa}) + \frac{1}{3} \alpha(A-1)(1-A^2) \dot{V}_{sa} \\ &= (1-\alpha) \dot{V}_{sa}\end{aligned}\quad (3.66)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{L2} &= \frac{1}{3} \alpha(A^2-1)(1-A^2) \dot{V}_{sa} \\ &= \alpha A^2 \dot{V}_{sa}\end{aligned}\quad (3.67)$$

∴ 負荷電圧の不均衡率は下式となる

$$\begin{aligned}R_{UB(L)} &= \left| \frac{\dot{V}_{L2}}{\dot{V}_{L1}} \right| \\ &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \left(\alpha = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \right)\end{aligned}\quad (3.68)$$

続いて、受電端電圧の不均衡率を同様にして求める。

$$\dot{V}_{ta} = \dot{V}_{sa} - \beta \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.69)$$

$$\dot{V}_{tb} = \dot{V}_{sb} + \beta \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.70)$$

$$\dot{V}_{tc} = \dot{V}_{sc} \quad (3.71)$$

$$\beta = \frac{X_s}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \quad (3.72)$$

従って、式(3.65) 及び式(3.66)と同様にして整理すると、式(3.72), (3.73) が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_{t1} &= \frac{1}{3} (3 \dot{V}_{sa}) + \frac{1}{3} \beta(A-1)(1-A^2) \dot{V}_{sa} \\ &= (1-\beta) \dot{V}_{sa}\end{aligned}\quad (3.73)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{t2} &= \frac{1}{3}\beta(A^2 - 1)(1 - A^2)\dot{V}_{sa} \\ &= \beta A^2 \dot{V}_{sa}\end{aligned}\quad (3.74)$$

V_{t1} : 受電端正相電圧 V_{t2} : 受電端逆相電圧

∴ 受電端電圧の不均衡率は下式となる

$$\begin{aligned}R_{UB}(t) &= \frac{|\dot{V}_{t2}|}{|\dot{V}_{t1}|} \\ &= \frac{\beta}{1 - \beta} \quad \left(\beta = \frac{X_s}{2\{X_L + X_s(1 - k)\}} \right)\end{aligned}\quad (3.75)$$

以上、式(3.67) (3.74)において

$$X_L = 1.0 \quad X_s = 0.2$$

として、負荷電圧 V_L 、受電端電圧 V_t の不均衡率を図示すると、図3.20となる。

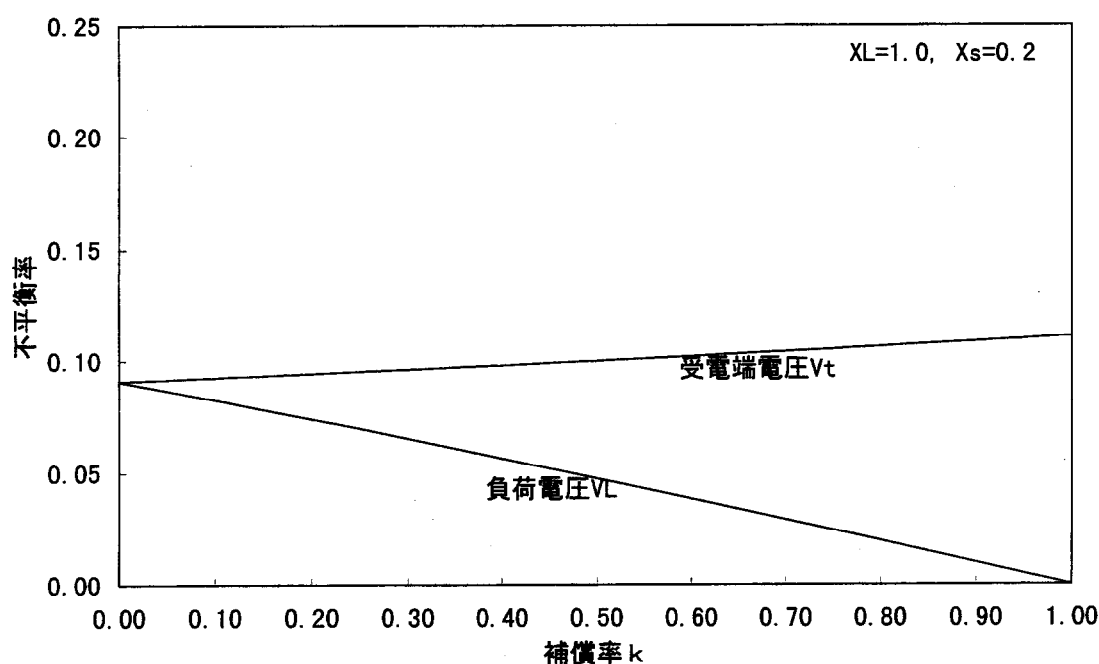


図 3.20 直列補償時の負荷電圧と受電端電圧の不均衡率

3.4.3 並列補償特性

図3.21に不平衡に対する並列補償モデルを示す。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

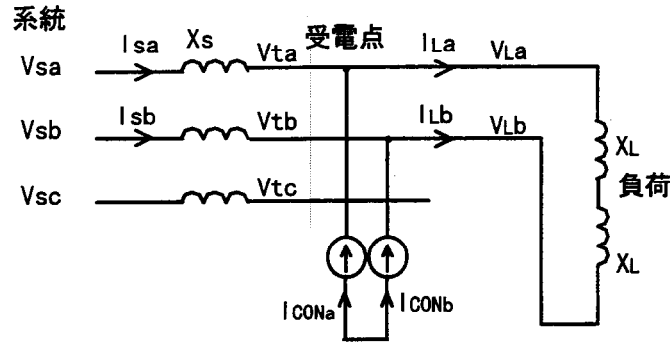


図 3. 2 1 三相不平衡電圧に対する並列補償モデル

このモデルに対して以下の関係式が求められる。

$$\dot{V}_s(ab) = \dot{V}_{sa} - \dot{V}_{sb} \quad \dot{V}_L(ab) = \dot{V}_{La} - \dot{V}_{Lb} \quad (3.76)$$

$$\dot{I}_{La} = \frac{\dot{V}_L(ab)}{j2X_L} = -\dot{I}_{Lb} \quad (3.77)$$

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - jX_s \dot{I}_{sa} \quad (3.78)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} - jX_s \dot{I}_{sb} \quad (3.79)$$

$$\dot{I}_{sa} = \dot{I}_{La} - \dot{I}_{CONa} \quad (3.80)$$

$$\dot{I}_{sb} = \dot{I}_{Lb} - \dot{I}_{CONb} \quad (3.81)$$

ここで k ($0 \leq k \leq 1$) を補償率として並列補償器の出力電流（補償電流） I_{CONa}, I_{CONb} を、以下のように定義する。

$$\dot{I}_{CONa} = k j X_s \dot{I}_{La} \quad (3.82)$$

$$\dot{I}_{CONb} = k j X_s \dot{I}_{Lb} (= -\dot{I}_{CONa})$$

$$\dot{I}_{sa} = \dot{I}_{La} - \dot{I}_{CONa} = (1-k) \dot{I}_{La} \quad (3.83)$$

$$\dot{I}_{sb} = -(1-k) \dot{I}_{La}$$

以上より、

$$\dot{V}_L(ab) = \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.84)$$

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - \frac{X_s}{2X_L} (1-k) \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.85)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} + \frac{X_s}{2X_L} (1-k) \frac{X_s}{X_L + X_s(1-k)} \dot{V}_s(ab) \quad (3.86)$$

が得られる。

ここで各定数を以下とし、

$$X_L = 1.0 \quad X_s = 0.2$$

補償率 k ($0 \sim 1$) を横軸として、負荷電圧 $V_L(ab)$ (= 受電端電圧 $V_t(ab)$) を系統母線線間電圧 $V_s(ab)$ で規格化して示すと、図3. 22の通りとなる。

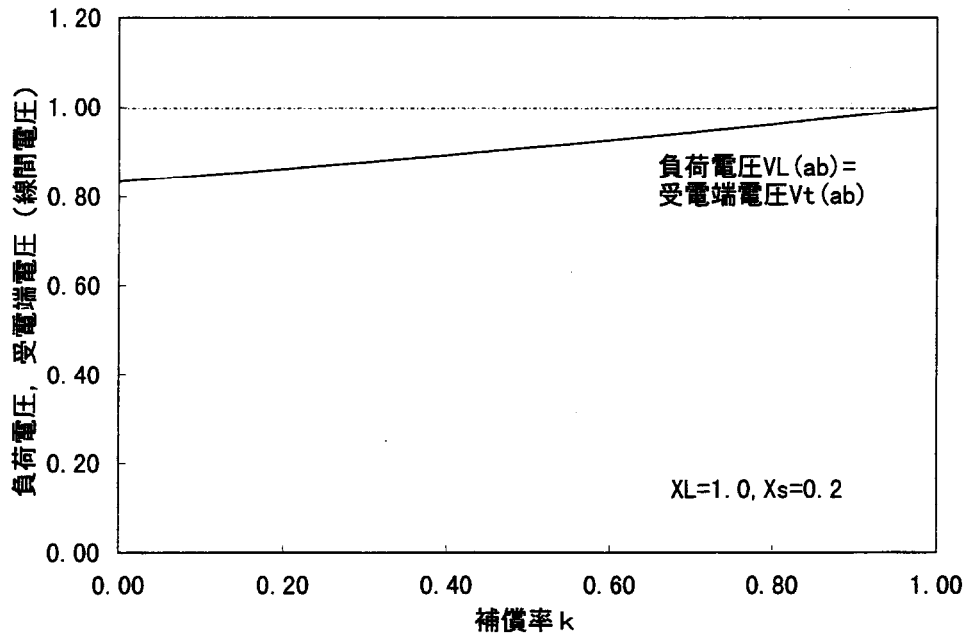


図 3. 22 三相不平衡電圧に対する並列補償特性

また、装置容量は次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 S &= |\dot{I}_{\text{con}a}| \cdot |\dot{V}_L(ab)| \\
 &= \left| k \frac{\dot{V}_L(ab)}{2jX_L} \right| \cdot |\dot{V}_L(ab)| \\
 &= k \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \right\}^2 \frac{V_s(ab)^2}{2X_L}
 \end{aligned} \tag{3.87}$$

これより補償率 k ($0 \sim 1$) に対して、同様に

$$X_L = 1.0 \quad X_s = 0.2$$

として装置容量を負荷容量 $V_s(ab)^2 / 2X_L$ で規格化して示すと図3. 23となる。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

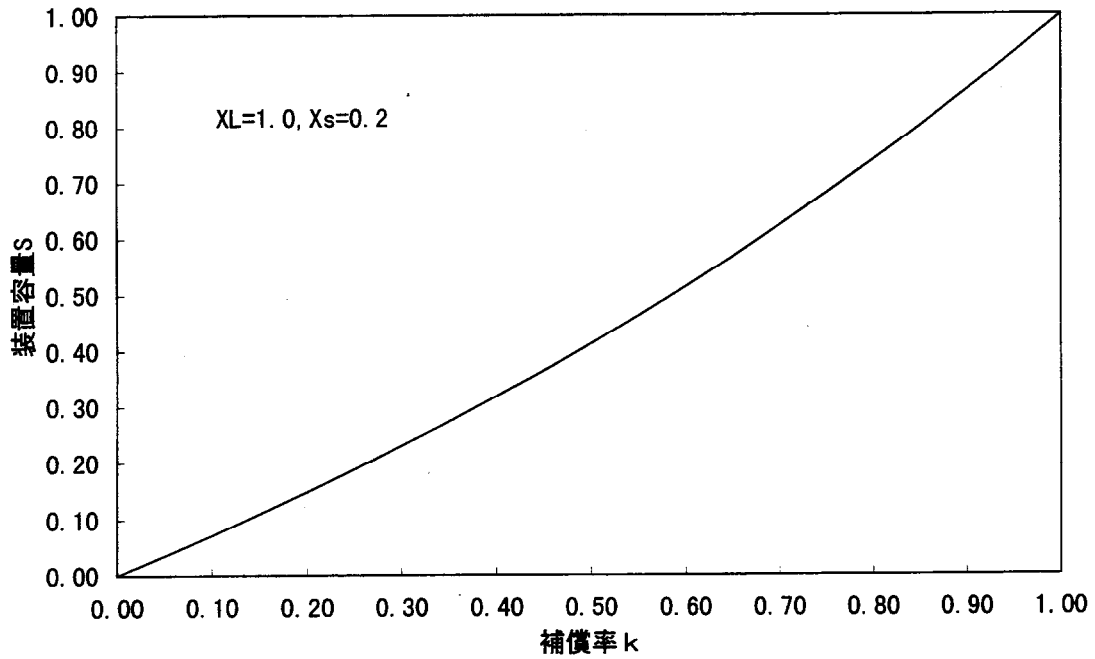


図 3.23 三相不平電圧に対する並列形補償器の装置容量

次に負荷電圧の不均衡率を求めると以下となる。

式(3.84), (3.85)より

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}_{sa} - \gamma \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.88)$$

$$\dot{V}_{Lb} = \dot{V}_{sb} + \gamma \dot{V}_{s(ab)} \quad (3.89)$$

$$\dot{V}_{Lc} = \dot{V}_{sc} \quad (3.90)$$

$$\text{ここで、} \gamma = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \quad (3.91)$$

従って、正相電圧 V_{L1} と逆相電圧 V_{L2} はそれぞれ下式となる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{L1} &= \frac{1}{3}(3\dot{V}_{sa}) + \frac{1}{3}\gamma(A-1)(1-A^2)\dot{V}_{sa} \\ &= (1-\gamma)\dot{V}_{sa} \end{aligned} \quad (3.92)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{L2} &= \frac{1}{3}\gamma(A^2-1)(1-A^2)\dot{V}_{sa} \\ &= \gamma A^2 \dot{V}_{sa} \end{aligned} \quad (3.93)$$

∴負荷電圧の不均衡率は下式となる

$$\begin{aligned} R_{UB(L)} &= \left| \frac{\dot{V}_{L2}}{\dot{V}_{L1}} \right| \\ &= \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad \left(\gamma = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \right) \end{aligned} \quad (3.94)$$

以上、式(3.92)において

$$X_L = 1.0 \quad X_S = 0.2$$

として、負荷電圧 V_L 、受電端電圧 V_t の不均衡率を図示すると、図3.24となる。

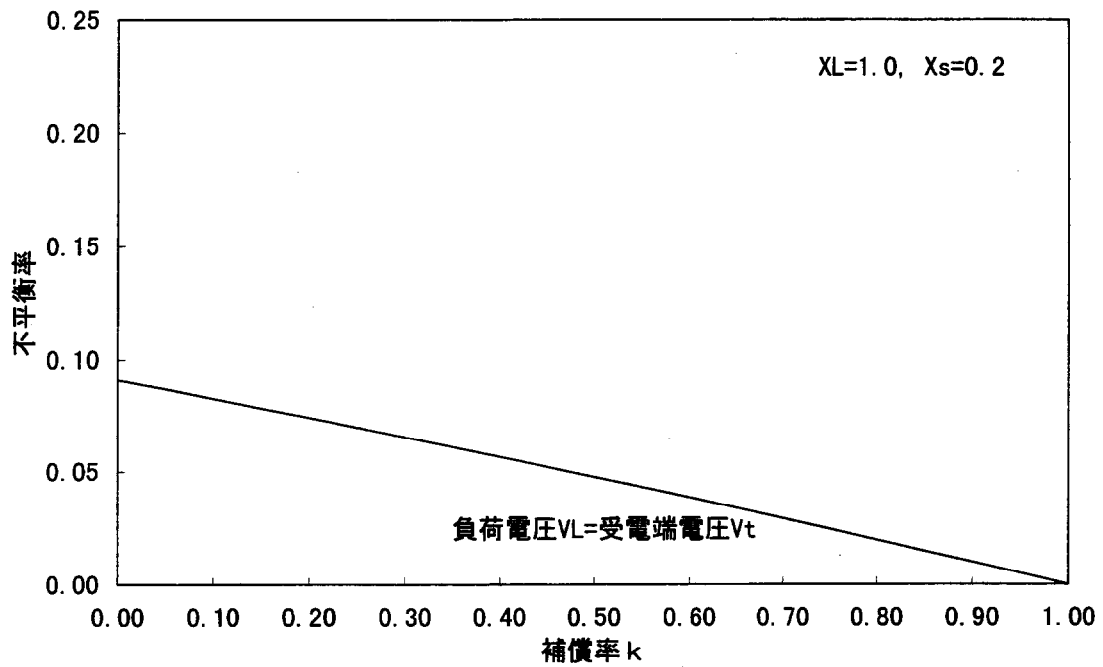


図 3.24 並列補償時の負荷電圧（＝受電端電圧）の不均衡率

3.5 考察

前節までに導出した特性式をまとめると表3.1～表3.3の通りとなる。

本節では、これらをもとに電圧変動に対する直列形補償と並列形補償の特徴を比較検討し、それぞれの適用性を述べる。

表 3. 1 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較（下位側負荷）

	直列形補償	並列形補償
等価回路		
補償器出力	$V_{CON} = k j X_s I_s = k \frac{X_s}{X_L} V_L \quad (0 \leq k \leq 1)$	$I_{CON} = k I_L \quad (0 \leq k \leq 1)$
負荷電圧 V_L	$V_L = \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} V_s$	$V_L = \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} V_s$
受電端電圧 V_t	$V_t = \left(1 - \frac{X_s}{X_L} \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)}\right) V_s$	$V_t = \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} V_s$
装置容量	$S = k \frac{X_s}{X_L} \cdot \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \right\}^2 \cdot \frac{V_s^2}{X_L}$	$S = k \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \right\}^2 \frac{V_s^2}{X_L}$
電圧補償特性		
所要装置容量		
特徴	● 直列形，並列形共に負荷電圧補償可能 ● 並列形は受電端電圧の補償も可能 ● 直列形は逆に受電端電圧変動増大 ● 直列形は小容量装置で補償可能	

表 3. 2 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較（上位側負荷）

	直列形補償器	並列形補償器
等価回路		
補償器出力	$V_{CON} = k j X_S I_S = k \frac{X_S}{X_S + X_M} V_S \quad (0 \leq k \leq 1)$	$I_{CON} = k I_M \quad (0 \leq k \leq 1)$
負荷電圧 V_L	$V_L = \frac{X_M + k X_S}{X_S + X_M} V_S$	$V_L = \frac{X_M}{X_M + X_S(1-k)} V_S$
受電端電圧 V_t	$V_t = \frac{X_M}{X_S + X_M} V_S$	$V_t = \frac{X_M}{X_M + X_S(1-k)} V_S$
装置容量	$S = k \frac{X_S}{X_S + X_M} \cdot \frac{V_S^2}{X_L}$	$S = k \left\{ \frac{X_M}{X_M + X_S(1-k)} \right\}^2 \frac{V_S^2}{X_M}$
電圧補償特性		
所要装置容量		
特徴	●直列形，並列形共に負荷電圧補償可能 ●並列形は系統全体の電圧補償を行う。 ●従って並列形は大容量が必要 ●直列形は小容量装置で補償可能	

表 3. 3 直列形電圧補償と並列形電圧補償の比較 (三相不平衡補償)

	直列形補償	並列形補償
等価回路		
補償器出力	$V_{CONa} = k jX_s I_a = k \frac{X_s}{2X_L} V_L(ab) \quad (0 \leq k \leq 1)$ $= -V_{CONb}$	$I_{CONa} = k I_L a \quad (0 \leq k \leq 1)$ $= -I_{CONb}$
負荷電圧 VL 不平衡率	$R_{UB(L)} = \frac{ V_{L2} }{ V_{L1} } = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \left(\alpha = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \right)$	$R_{UB(L)} = \frac{ V_{L2} }{ V_{L1} } = \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad \left(\gamma = \frac{X_s(1-k)}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \right)$
受電端電圧 Vt 不平衡率	$R_{UB(t)} = \frac{ V_{t2} }{ V_{t1} } = \frac{\beta}{1-\beta} \quad \left(\beta = \frac{X_s}{2\{X_L + X_s(1-k)\}} \right)$	同上
装置容量	$S = k \frac{X_s}{X_L} \left\{ \frac{X_L}{X_L + X_s(1-k)} \right\}^2 \frac{V_s(ab)^2}{2X_L}$	$S = k \left\{ \frac{X_L}{X_L + 2X_s(1-k)} \right\}^2 \frac{V_s(ab)^2}{X_L}$
不平衡補償特性		
所要装置容量		
特徴	●直列形, 並列形共に負荷電圧補償可能 ●並列形は受電端電圧の補償も可能 ●直列形は逆に受電端電圧変動が増大 ●直列形は小容量装置で補償可能	

3.5.1 電圧補償特性の比較

(1) 直列補償

下位側負荷に起因する電圧変動、上位側負荷に起因する電圧変動及び三相電圧不平衡に対して、直列形補償器設置点下位側電圧については、原理的に100%補償可能である。

しかし、装置設置点上位側の電圧変動や不平衡は補償できない。むしろ、下位側電圧が補償されて負荷電流が増加したことにより悪化する傾向となる。(図3.3, 図3.20参照)

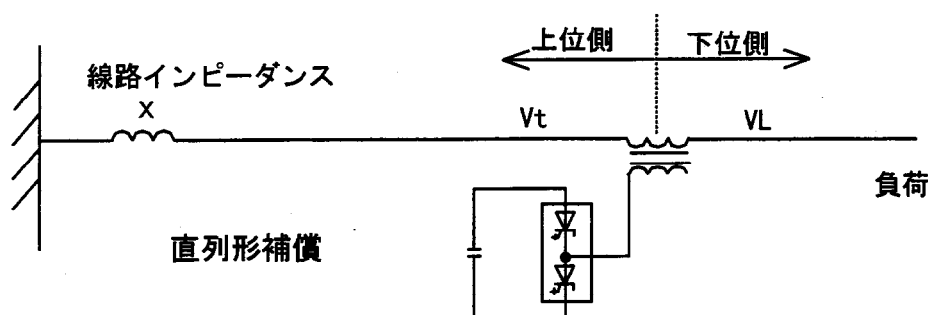


図 3.25 直列補償の基本構成

(2) 並列補償

下位側負荷に起因する電圧変動、上位側負荷に起因する電圧変動及び三相電圧不平衡に対して、装置設置点下位側、上位側共、原理的に100%補償可能である。(図3.6, 図3.13, 図3.22参照)

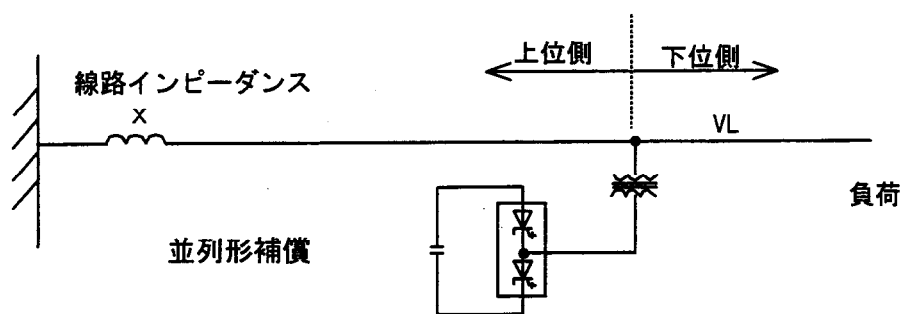


図 3.26 並列補償の基本構成

3.5.2 装置の所要容量

(1) 直列形補償器

直列形補償器の所要容量は、補償器に流れる負荷側電流と、送電線インピーダンスにより降下する電圧との積により決まる。3.2～3.4項で示したモデル（負荷が誘導性負荷のみ）であれば、並列形補償器に比べて数分の一以下の小容量でよい。特に、系統上位側負荷による電圧変動の補償に際しては、並列形補償器が負荷容量の応じて大容量化するため、相対的に非常に小容量で済むことになる。

(2) 並列形補償器

並列形補償器の所要容量は電圧変動或いは三相電圧不平衡などを引き起こす負荷の無効電力容量によって決まる。

3. 2～3. 4項で示したモデル（誘導性負荷）であれば負荷の取る電力はすべて無効電力であるから、100%補償するには負荷に等しい容量が必要となる。この場合、直列形補償器に対して数倍の所要容量となる。また、系統上位側の負荷による電圧変動を抑制しようとしたときには負荷容量が大きくなると想定されるため、更に大容量装置が必要となる。

(3) 負荷力率を考慮した所要装置容量の比較

前項(1)，(2)では3. 2～3. 4項に示した誘導性負荷に対する直列形／並列形補償器それぞれの所要容量について述べた。しかし実際には負荷は有効電力を取る。そこで、負荷力率を考慮してこれらの容量を比較する。

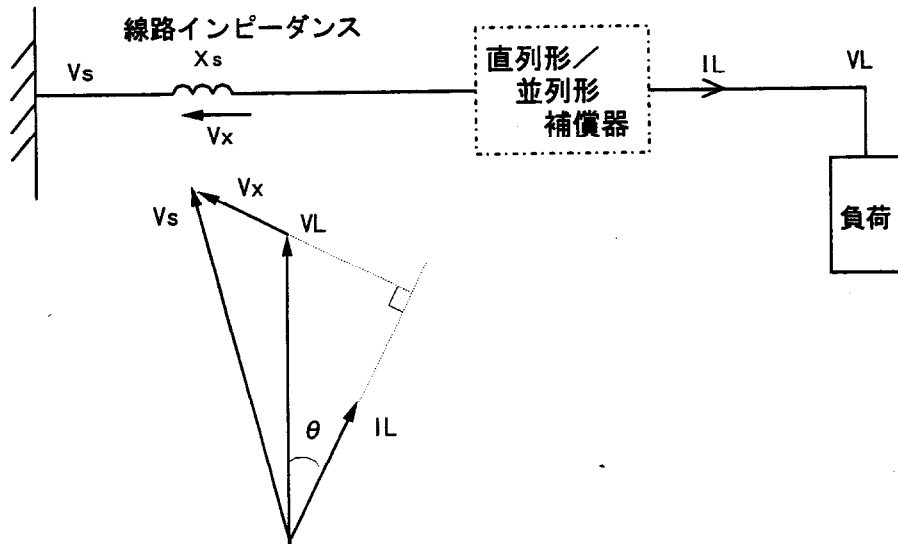


図 3. 27 負荷力率を考慮した直列／並列補償モデル

図3. 27に負荷力率を考慮した場合の直列及び並列補償の解析モデルを示す。また、同図に併記したベクトル図は無補償時の電圧，電流ベクトルである。

並列補償では、負荷の取る無効電力を系統に供給することで電圧補償を行う。ここでは、負荷の無効電力を100%補償する場合を検討対象とする。そして、補償条件を合わせるために、直列補償は、並列補償を行った際に改善される負荷電圧まで補償することとする。この場合のベクトル図を図3. 28に示す。これは、系統電圧Vsを基準に示している。また、負荷電圧VLを基準にしたベクトル図を図3. 29に示す。

なお、図3. 28と図3. 29の図において、添え字は以下を表している

- | | |
|-------|------|
| 添え字 1 | 並列補償 |
| 添え字 2 | 直列補償 |

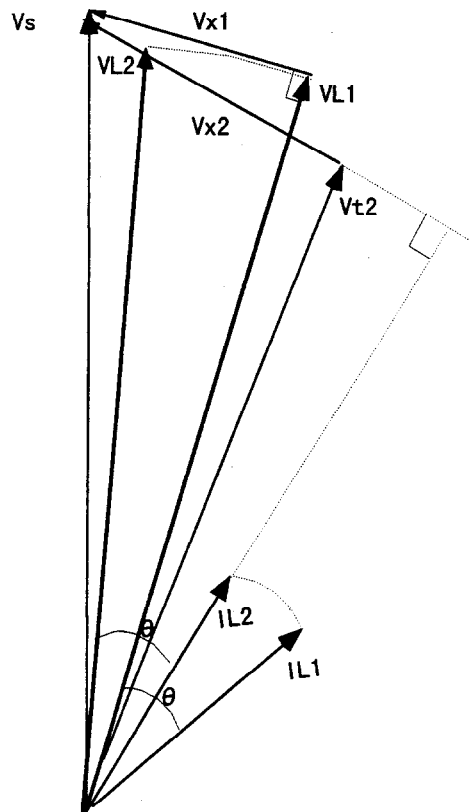


図 3. 2 8 並列補償と直列補償のベクトル関係 (系統電圧基準)

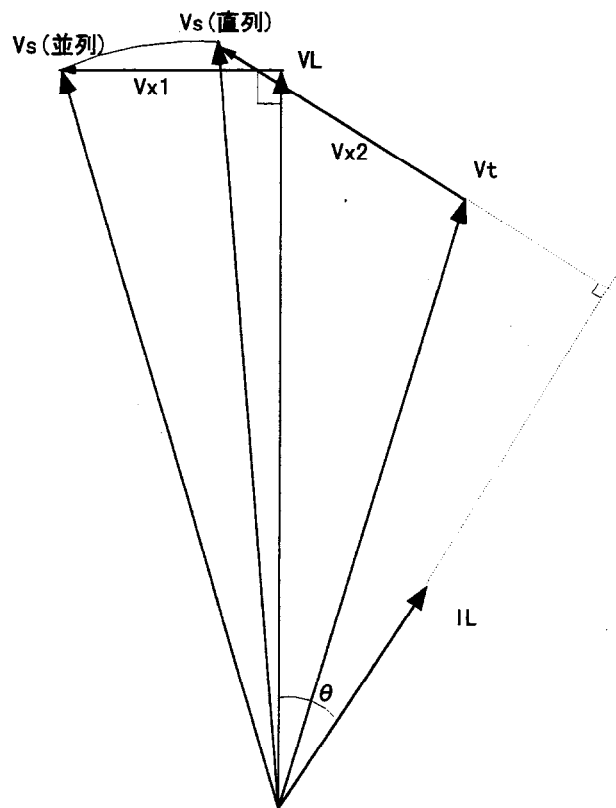


図 3. 2 9 並列補償と直列補償のベクトル関係 (負荷電圧基準)

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

以上の条件で並列補償と直列補償それぞれの所要容量を求める。

① 並列補償

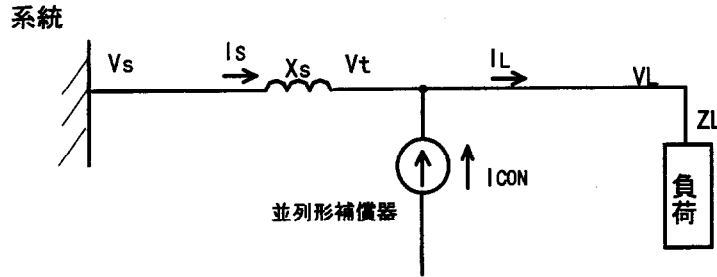


図 3. 3 0 並列補償モデル

負荷電圧 V_L と負荷電流 I_L を次のように定義する。

$$\dot{V}_L = V_{LP} \quad (3.95)$$

$$\dot{I}_L = \dot{V}_L / \dot{Z}_L = V_{LP}(\cos \theta + j \sin \theta) \quad (3.96)$$

$$(\dot{Z}_L = \cos \theta - j \sin \theta \quad |\dot{Z}_L| = 1 \text{ pu})$$

このとき補償電流 I_{CON} は以下となる。

$$\dot{I}_{CON} = j V_{LP} \sin \theta \quad (3.97)$$

ここで、系統電圧 V_s を 1 pu とすると

$$V_{LP} = \frac{1}{\sqrt{1 + (X_s \cos \theta)^2}} \quad (3.98)$$

従って並列補償器運転出力は下式となる。

$$|\dot{V}_L| |\dot{I}_{CON}| = V_{LP} \cdot V_{LP} \sin \theta = \frac{\sin \theta}{1 + (X_s \cos \theta)^2} \quad (3.99)$$

実際の装置容量は少なくとも無負荷時の電圧、つまり系統電圧 V_s から決まるため

$$|\dot{V}_s| |\dot{I}_{CON}| = 1 \cdot |\dot{I}_{CON}| = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 + (X_s \cos \theta)^2}} \quad (3.100)$$

となる。

② 直列補償

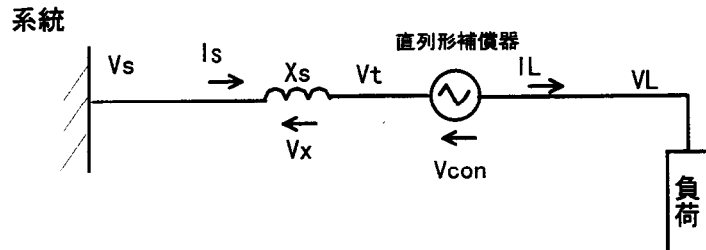


図 3. 3 1 直列補償モデル

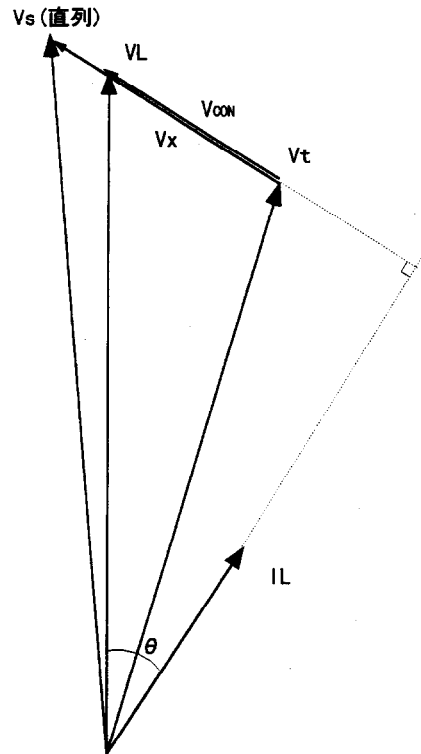


図 3. 3 2 直列補償時の電圧・電流ベクトル図

補償後の負荷電圧 V_L を並列補償時と等しくする条件により

$$|\dot{V}_L| = V_{LP} = \frac{1}{\sqrt{1 + (X_s \cos \theta)^2}} \quad (3.101)$$

となる。このときの補償電圧 V_{CON} の大きさを幾何学的に求めると下式となる。

$$|\dot{V}_{CON}| = V_{LP}(X_s + \sin \theta) - \sqrt{1 - (V_{LP} \cos \theta)^2} \quad (3.102)$$

従って、装置の所要容量は

$$|\dot{V}_{CON}| |\dot{I}_L| = |\dot{V}_{CON}| V_{LP} \quad (3.103)$$

となる。

③ 容量の比較

以上より、負荷力率を考慮した場合の並列補償と直列補償の容量比は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \frac{\text{直列補償容量}}{\text{並列補償容量}} &= \frac{|\dot{V}_{CON}| V_{LP}}{V_{LP} \sin \theta} = \frac{|\dot{V}_{CON}|}{\sin \theta} \\ &= \frac{V_{LP}(X_s + \sin \theta) - \sqrt{1 - (V_{LP} \cos \theta)^2}}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (3.104)$$

ここで、 V_{LP} は式(3.101)の通りである

これより、負荷力率をパラメータにして系統インピーダンスと上記容量比の関係を図示すると図3. 3 3の通りとなる。

第3章 系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性

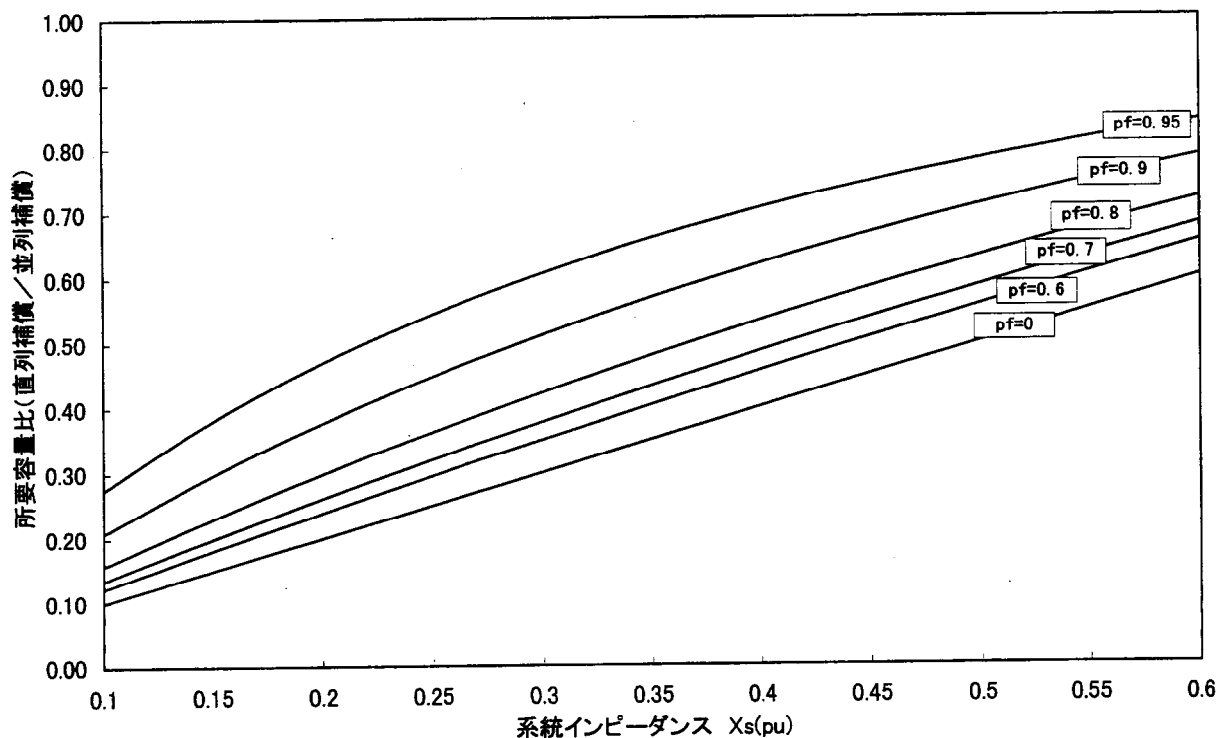


図 3. 3 3 負荷力率を考慮した直列補償と並列補償の容量比

図 3. 3 3 より負荷力率を考慮しても直列補償の方が並列補償より小容量で済むことが分かる。

3. 5. 3 適用設置個所

直列補償と並列補償の補償特性は前項に示したとおりである。これより、直列形補償器と並列形補償器を設置する適用箇所以下の通りと考えられる。

① 直列形補償器の用途

長距離送電線末端での負荷電圧補償や、上位側負荷等による電圧変動を下位側負荷に影響させないことを目的とする補償。

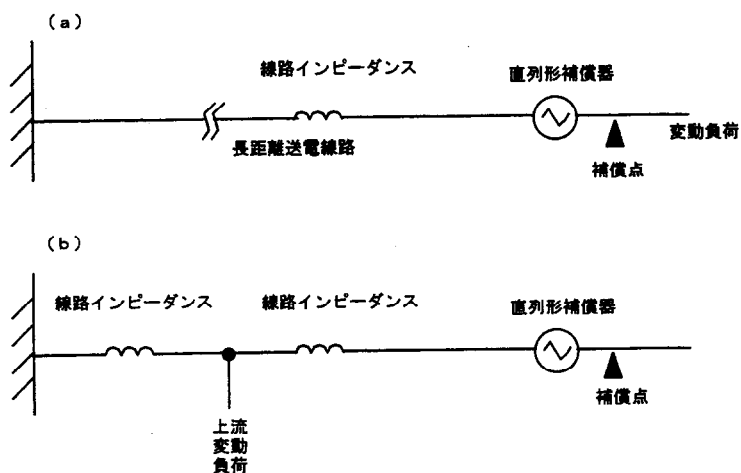


図 3. 3 4 直列形補償器の適用

② 並列形補償器

補償器設置点の下位側だけでなく、上位側も含めて系統全体の電圧を改善させる効果を狙う電圧補償の場合。

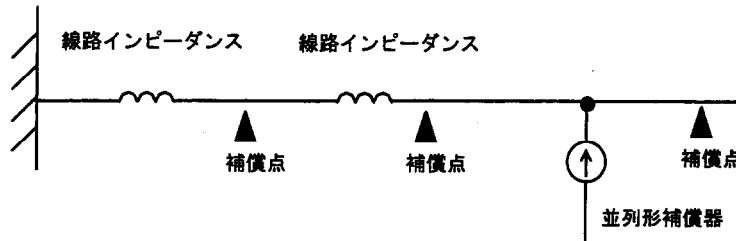


図 3. 3 5 並列形補償器の適用

3. 6 まとめ

本章では直列補償と並列補償の基本的な電圧補償特性について、その補償能力と所要容量を電源と系統リアクタンスおよび、系統上位側と下位側の3相又は単相リアクトル負荷による簡易なモデルを用いて解析的に求めた。

以下に得られた結果をまとめて示す。

(1) 直列補償と並列補償は、表 3. 4 に示す通りの補償が可能であることを示した。

表 3. 4 直列形補償と並列形補償の特徴と適用性

		直列形補償	並列形補償
電圧変動 不平衡補償	下位側	可	可
	上位側	不可	可

(2) 直列及び並列補償装置の所要容量は以下で表され、直列補償は並列補償に比べて小容量で済むことを示した。

直列補償容量： 負荷電流×送電線路降下電圧

並列補償容量： 負荷無効電力

(3) 直列及び並列補償装置の適正設置個所が以下の通りであることを述べた。

直列補償： ・長距離送電線末端

・上位系統の電圧変動が大きい系統

並列補償： ・系統全体に対して補償を行うことが要求される系統

補償の方が小容量で済むことを示した。

次章以降ではこれらの解析結果に基づき、直列形補償器と並列形補償器それぞれ実際の応用について、詳細な検討を行う。

第4章

系統電圧の並列形補償器による安定化

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

4. 1 まえがき

2章において自励式変換器による新しい能動的な電圧補償装置の有効性について述べた。これは、連続無段階の補償が行えることと共に、三相不平衡補償や高速補償の行えることが特徴であり、この特徴を活かすことが装置適用の要件であることを示した。

この補償装置は、大別して直列形補償器と並列形補償器に分類され、3章では直列補償と並列補償双方の補償特性の比較を解析的に示した。本章では、これらのうちで並列形電圧補償器に注目し、自励式変換器による並列補償器、すなわち自励式無効電力補償装置（自励式 SVC）の詳細な特徴と具体的応用について述べる。

SVCは、もともと適用する半導体の能力によって、他励式 SVC と自励式 SVC に分類される。本論文では、まずこれら他励式 SVC と自励式 SVC について所要容量と応答速度など性能を比較し、それぞれの特徴を比較検討する。そして、より高度な制御が可能な自励式 SVC に対して、下記の高性能系統補償機能の開発と実用機への適用について述べる。

- ・ 三相不平衡補償機能
- ・ 電圧動揺補償機能（フリッカ補償機能）

4. 2 他励式 SVC と自励式 SVC の比較

（1）容量に関する比較検討（三相不平衡補償時の所要容量）

現在広く実用されている SVC は、サイリスタを用いた他励式 SVC（TCR：Thyristor Controlled Reactor）である⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾。この基本構成を図4. 1に示す。本装置はサイリスタバルブにリアクトルを接続し、サイリスタを点弧角制御することでリアクトルに流れる電流を制御する。この結果遅れ無効電力が調整され、所定のコンデンサを並列接続することで進みから遅れまで連続的に無効電力調整が可能となる。従って、例えば進み $Q \text{ var}$ ，遅れ $Q \text{ var}$ の無効電力補償を行うには、以下の機器容量が必要となる。

- ・ サイリスタ，リアクトル $2 \times Q \text{ var}$
- ・ コンデンサ $Q \text{ var}$

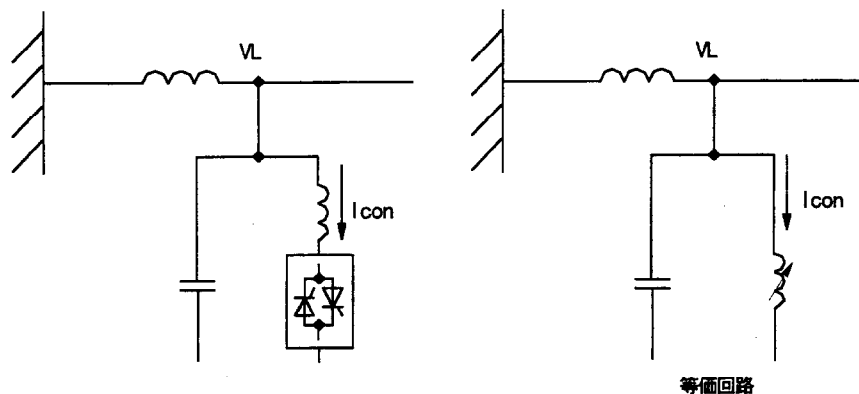


図4. 1 他励式 SVC の基本構成

一方、自励式SVCではGTOなどの自己消弧素子を用いて構成される。最近の半導体技術の進歩によって、この自励式SVCは大容量変換装置が製作できるようになり、これに応じて電力分野でも、自励式SVCの実用化が進められようとしている⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。図4.2に自励式SVCの原理構成と等価回路を示す。

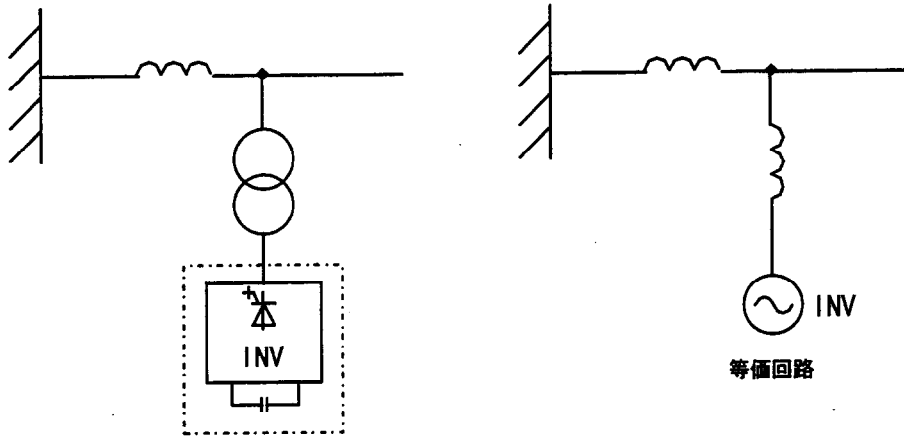


図4.2 自励式SVCの基本構成

他励式SVCに用いられるサイリスタは、その点弧タイミングのみ制御できるのに対して、IGBTやGTOなどの自己消弧デバイスは点弧、消弧の双方のタイミングを任意にコントロールできる。この制御能力により、自励式SVCは系統に並列の可変電圧源として機能し、原理的にコンデンサやリアクトルを用いることなく装置自身で進み遅れ任意の無効電力の連続調整が可能である。このため、装置の所要容量は無効電力補償容量に等しくなり、進み、遅れ双方の無効電力補償を行う際には、他励式に比べて変換器部の容量が1/2で済む。

ここでは、三相不平衡補償を行う場合の、他励、自励両者の所要容量の比較検討を行う。

① 他励式SVCによる不平衡補償

不平衡負荷電流をリアクトルとコンデンサにより平衡化できることは、従来から報告されている⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。

図4.3は単相抵抗負荷がUV相間に接続されている場合の平衡化を示すものである。この場合負荷抵抗Rに対して平衡化のために接続されるリアクトルとコンデンサの条件は以下の通りとなる。

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} R \quad (4.1)$$

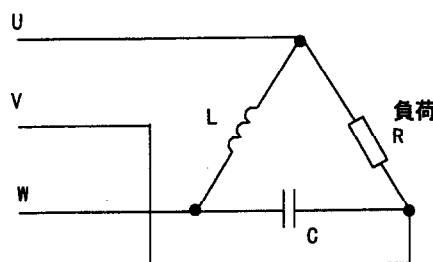


図4.3 単相R負荷に対する平衡化の基本回路

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

この原理に基づき、更に負荷の力率を考慮して、サイリスタ制御リアクトル（TCR）とコンデンサからなる他励式SVCで不平衡補償する場合以下の通りとなる。

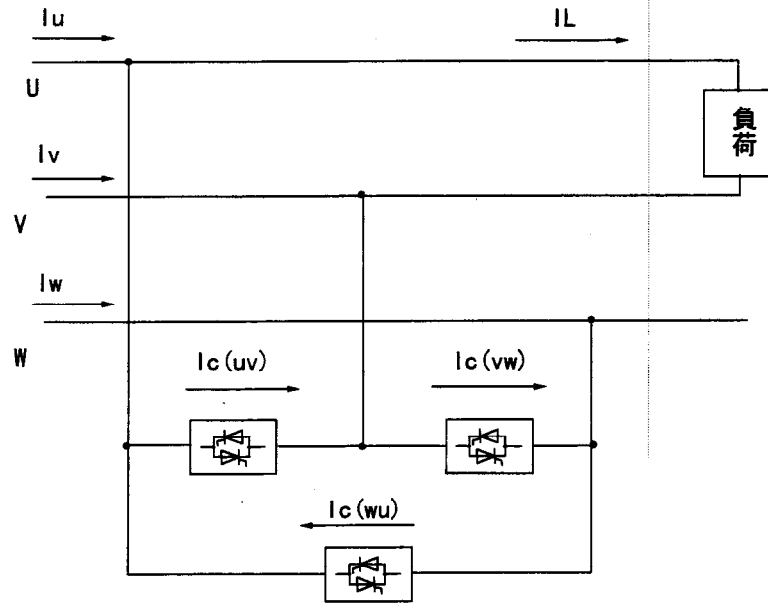


図4.4 他励式SVCによる単相負荷の平衡化

図4.4に、他励式SVCによる単相負荷が接続された系統の平衡化補償モデルを示す。まず単相負荷が接続されるU-V相の線間電圧 V_{UV} と負荷電流 $I_{L(UV)}$ を以下と定義する。

$$\dot{V}_{UV} = V_L \quad (4.2)$$

$$\dot{I}_{L(UV)} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (4.3)$$

(θ : 力率角)

- ・ 負荷電流の有効分に対する補償

有効電流成分 ($\cos \theta$) に対する他励式SVCの不平衡補償電流は式(4.1)より以下となる。

$$\dot{I}_{C(UV)1} = 0$$

$$\dot{I}_{C(VW)1} = \frac{1}{\sqrt{3}} j \cos \theta \cdot a$$

$$\dot{I}_{C(WU)1} = \frac{-1}{\sqrt{3}} j \cos \theta \cdot a^2$$

$$(a = \varepsilon^{-j\frac{2\pi}{3}})$$

(4.4)

- ・ 負荷電流の無効分に対する補償

無効電流成分 ($j \sin \theta$) に対する不平衡補償電流は下式となる。

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{C(UV)2} &= -j\frac{2}{3}\sin\theta \\
 \dot{I}_{C(VW)2} &= j\frac{1}{3}\sin\theta \cdot a \\
 \dot{I}_{C(WU)2} &= j\frac{1}{3}\sin\theta \cdot a^2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

以上より他励式SVC電流は下式となる。

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{C(UV)} &= \dot{I}_{C(UV)1} + \dot{I}_{C(UV)2} = -j\frac{2}{3}\sin\theta \\
 \dot{I}_{C(VW)} &= j\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\cos\theta + \frac{1}{3}\sin\theta\right) \cdot a = j\frac{2}{3}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \cdot a \\
 \dot{I}_{C(WU)} &= j\left(\frac{-1}{\sqrt{3}}\cos\theta + \frac{1}{3}\sin\theta\right) \cdot a^2 = j\frac{2}{3}\sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \cdot a^2
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

このとき補償後の電源電流は以下となる。

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_U &= \dot{I}_{L(UV)} + \dot{I}_{C(UV)} - \dot{I}_{C(WU)} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}(\cos\theta + j\sin\theta) = \frac{1}{\sqrt{3}}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}\dot{I}_{L(UV)} \\
 \dot{I}_V &= \dot{I}_U \cdot a \\
 \dot{I}_W &= \dot{I}_U \cdot a^2
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

② 自励式SVCによる不平衡補償

自励式SVCでは、負荷の取る逆相電流を各相で直接補償できる。このため補償電流は以下により求まる。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{I}_{L1} \\ \dot{I}_{L2} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & A & A^2 \\ 1 & A^2 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{L(UV)} \\ -\dot{I}_{L(UV)} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_{L(UV)} \begin{bmatrix} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}} \\ \varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} \end{bmatrix} \\
 \left(\begin{array}{l} \dot{I}_{L1}: \text{正相電流} \\ \dot{I}_{L2}: \text{逆相電流} \end{array} \right. & \quad \left. A = \varepsilon^{j2\pi/3} \right)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

以上より補償装置の電流（相電流）は以下となる。

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{CU} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\varepsilon^{j\frac{\pi}{6}}\dot{I}_{L(UV)} \\
 \dot{I}_{CV} &= \dot{I}_{CU} \cdot a^2 \\
 \dot{I}_{CW} &= \dot{I}_{CU} \cdot a
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

また電源電流は以下の通り他励式SVCにより補償したときと一致する。

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

$$\begin{aligned}\dot{I}_U &= \frac{1}{\sqrt{3}} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}} \dot{I}_{L(UV)} \\ \dot{I}_V &= \dot{I}_{CU} \cdot a \\ \dot{I}_W &= \dot{I}_{CU} \cdot a^2\end{aligned}\tag{4.10}$$

③ 不平衡補償における他励式SVCと自励式SVCの容量比較

他励式SVCの容量は式(4.6)から求められる。これをもとに力率角に対する各相の電流を図示すると図4.5となる。

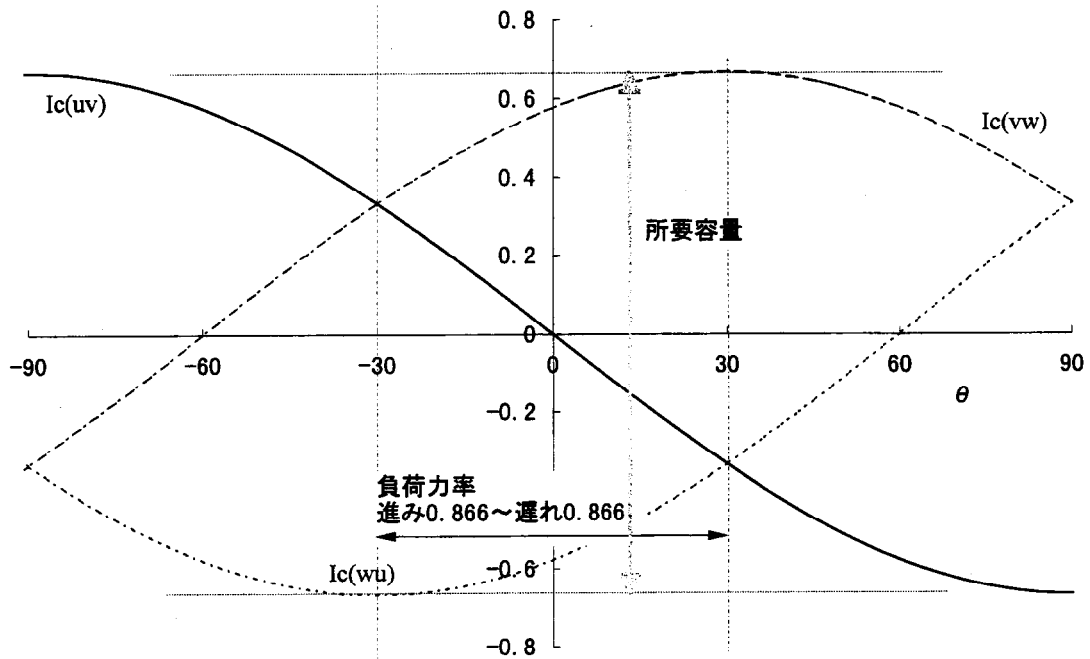


図4.5 不平衡補償に対する他励式SVCの各相電流と所要容量

本図からも分かるように、単相負荷力率が

進み $\cos \pi/6 \sim$ 遅れ $\cos \pi/6$

の範囲をであるとすると、変換器の所要容量 S は、単相負荷容量を 1pu としたとき

$$S = \frac{4}{3} \text{ (pu)}\tag{4.11}$$

となる。

一方自励式SVCの場合には、式(4.9)に示したように変換装置電流の大きさは、負荷力率に関係ない。他励式SVCと容量を比較するために、相電流で示した式(4.9)を他励式SVCと同様の相間に換算すると以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{C(UV)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \epsilon^{-j\frac{\pi}{6}} \dot{I}_{CU} = \frac{1}{3} \dot{I}_{L(UV)} \\
 \dot{I}_{C(VW)} &= \frac{1}{3} \dot{I}_{L(UV)} \cdot a^2 \\
 \dot{I}_{C(WU)} &= \frac{1}{3} \dot{I}_{L(UV)} \cdot a
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

これより自励式の変換装置容量 S はとなる。

$$S = \frac{1}{3} \text{ (pu)} \tag{4.13}$$

従って、式(4.11)と式(4.13)より単相負荷（力率角進み $\pi/6 \sim$ 遅れ $\pi/6$ ）電流を平衡化させる時、以下のことがいえる。

・不平衡補償において、他励式 SVC の容量は自励式 SVC の 4 倍必要

つまり、三相平衡無効電力補償の時に他励式が 2 倍の容量が必要であるのに対して、不平衡補償時には他励式 SVC は自励式 SVC に対して更に大容量となることを示している。この原因は、自励式 SVC が各相で指令に応じて任意の位相と振幅の電流を出力できるのに対して、他励式の場合、系統電圧に対して必ず直交方向の電流を流すことで不平衡補償を行うという制約から生じたものである。

(2) 制御応答速度の比較

図 4. 6 は、他励式 SVC の動作波形を示している。他励式 SVC では、電源半周期に 1 回のサイリスタ点弧角制御により無効電力が制御される。従って、他励式 SVC の場合、最大電源半サイクルの制御むだ時間が生じ、これが応答速度の遅れに大きな影響を及ぼす。

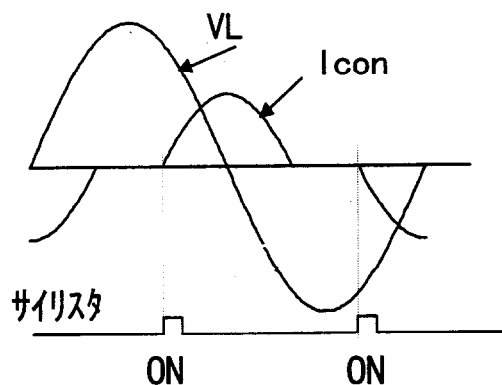


図 4. 6 他励式 SVC の動作波形

一方、図 4. 7 は、自励式 SVC に用いられる PWM インバータ（単相インバータで表示）の出力電圧波形例を示している。この場合、電源 1 周期に 1 相あたり 9 回のオン／オフを繰り返す PWM 波形を示している。従って、単純に n パルスで考えた場合には、むだ時間は他励式の場合の $1/n$ 以下になるものと考えられる。更に、自励式 SVC では、一般に容量の

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

制約や、高調波の低減から多重回路方式が採用されることが多い。この場合には多重数を m としたときむだ時間は更にその $1/m$ 程度となるものと考えられ、多重化の効果についての研究報告がされている。⁽⁴⁷⁾

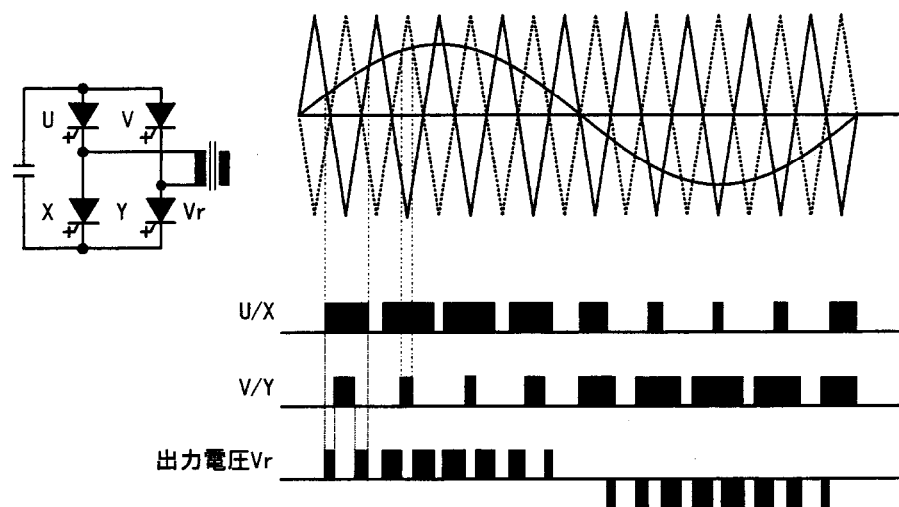


図4. 7 自励式SVCのPWM波形と出力電圧

本論文も、この多重化の効果を確認するためにシミュレーションによる波形解析を行った。シミュレーション解析の条件と解析ケースは以下の通りである。

解析条件

変換方式：	多重PWMインバータ
ブリッジ構成：	単相インバータ×3相
多重数：	2多重，4多重，6多重
パルス数：	3パルス，6パルス，9パルス
連系リアクトル：	15%
出力周波数：	60Hz

表4. 1 解析ケース

パルス数	2多重	4多重	6多重
3	CASE 1	CASE 2	CASE 3
6	CASE 4	CASE 5	CASE 6
9	CASE 7	CASE 8	CASE 9

以上に対するシミュレーション結果として定常波形を図4. 8，過渡応答波形を図4. 9に示す。一般に、PWMのパルス数を高くとることによって定常波形と制御応答が改善されることが知られているが、この解析結果より、多重数によっても波形と応答が改善されることが分かる。傾向として、パルス数と多重数のかけ算を等価パルス数と見なしたとき、表4. 2に示すように、これが同一の装置では、多重数の多い方が、出力高調波が低減されるといえる。ただし、過渡応答については、波形の歪みを無視するなら、いずれのケースでも1～2ms程度の応答時間で追従している。

表4. 2 多重数、パルス数と出力高調波

等価パルス数	出力高調波
1 2	4 多重3パルスPWM < 2 多重6パルスPWM
1 8	6 多重3パルスPWM < 2 多重9パルスPWM
3 6	6 多重6パルスPWM < 4 多重9パルスPWM

このように自励式インバータは、電源周期半サイクルに1回の出力制御を行う他励式に比べて、PWMと多重構成により、高速かつ任意位相の出力電圧制御可能となり、飛躍的に高性能なSVCを構成できるといえる。

(3) 比較結果のまとめ

表4. 3は、以上の検討結果に基づいて他励式SVCと自励式SVCの特徴比較をまとめて示したものである。この表から分かるように、自励式SVCは他励式SVCに対して、特に以下の点で優れた特徴を持っていると言える。

- ・3相不平衡補償性能
- ・高速制御性能

表4. 3 他励式SVCと自励式SVCの比較

項 目	他励式SVC	自励式SVC
調整, 制御	連 続 (可変インピーダンス制御)	連 続 (電流制御)
応答速度	10～数十ms (電源半サイクルのむだ時間による)	数ms (PWMと多重により高速化可能)
不平衡補償	可 (但し所要容量4倍 ^{*1})	可
装置容量	2 (平衡補償時) 4 (不平衡補償時 ^{*1})	1
その他の特徴	・高調波発生大 対策要 ・補償限界では、定インピーダンス特性により低下電圧の2乗で補償能力低下	・高調波発生小 対策易 ・補償限界では、定電流特性により低下電圧に比例して補償能力低下

*1 単相負荷の平衡化補償の場合

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

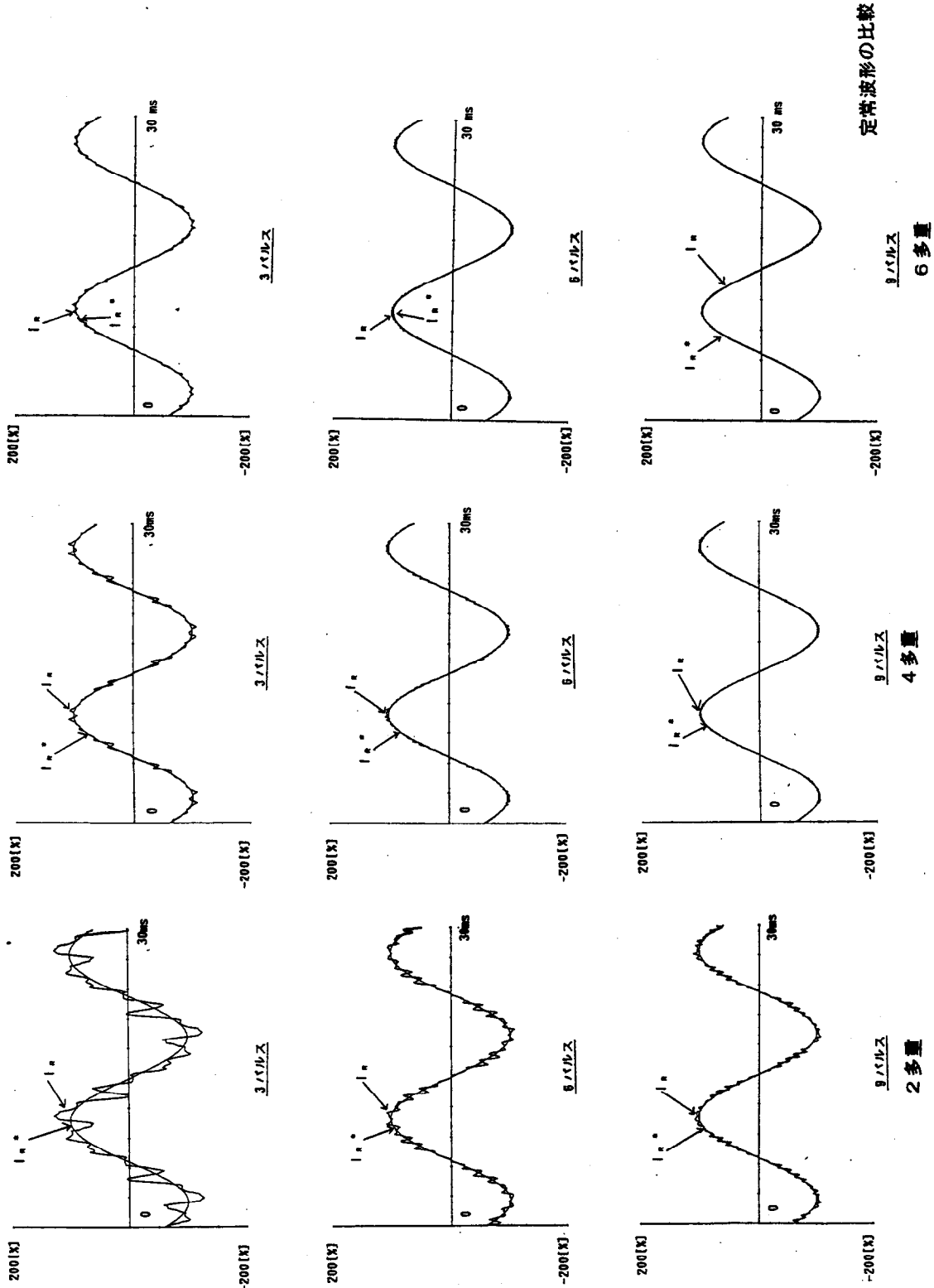


図4.8 定常波形の比較

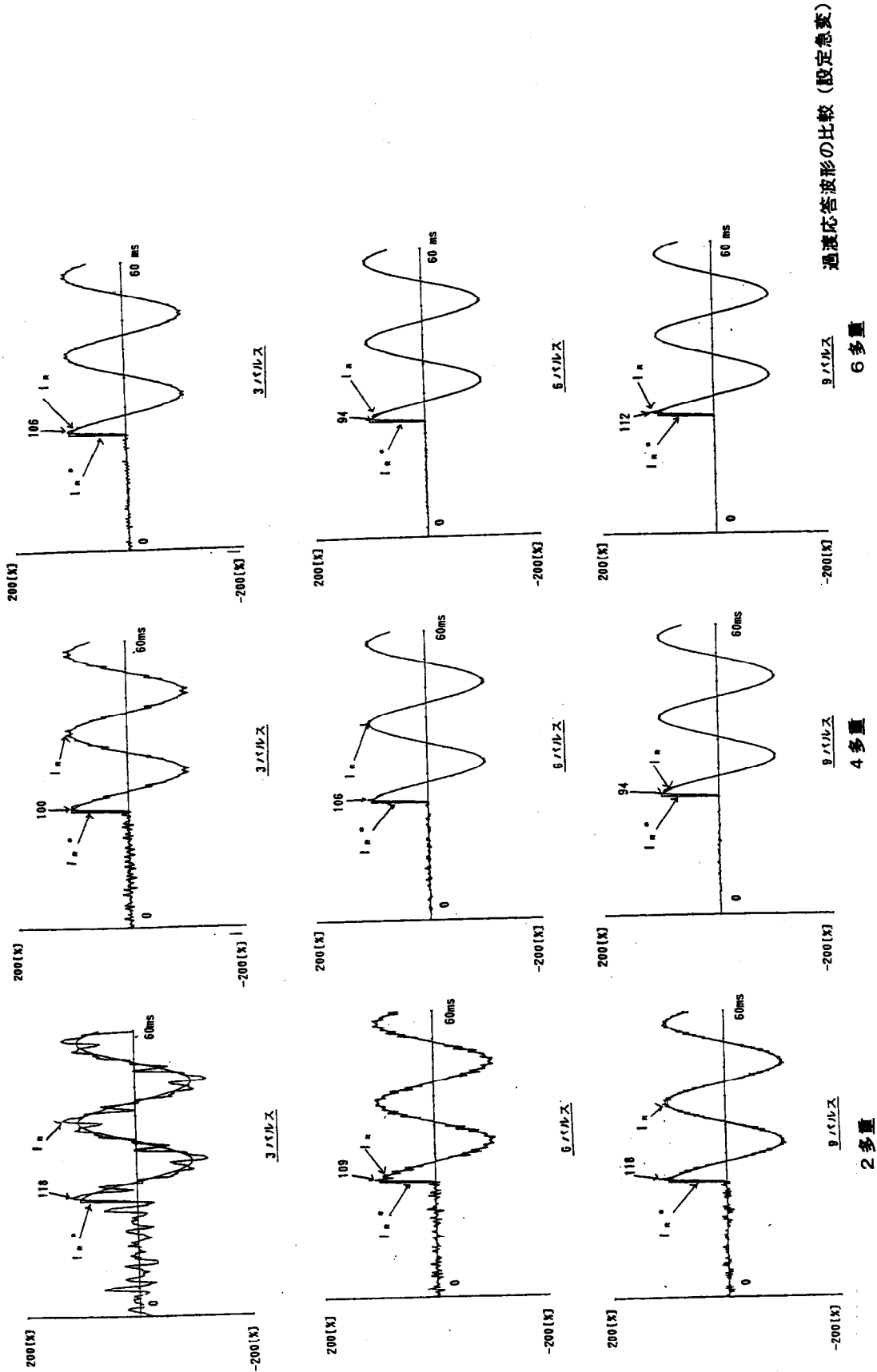


図4.9 過渡応答波形 (設定急変) の比較

4. 3 不平衡補償機能の開発

4. 2節で示したように、自励式SVCは不平衡補償を行う場合には、他励式に比べて極めて小容量で済む特徴がある。これは、他励式SVCの出力電流が電圧に対して常に直交方向にしか流せないのに対して、自励式は任意の位相で（但し、三相合成の電力は零の条件は満たす）電流を流すことができることによる。この特徴を活かした三相不平衡補償制御方式について述べる。

4. 3. 1 装置の概要

(1) 補償装置の前提条件

ここで扱う補償装置は電力系統用を前提として、数MVA級以上の大容量システムに適する方式であることを条件とする。この場合、運転効率の向上や冷却、或いは使用する半導体デバイスの動作速度の制約から、例えばアクティブフィルタのような高速スイッチングを伴う電流瞬時値制御は行わないこととする。この条件下で、自励式SVCの能力を最大限に生かし、通常の電圧補償に加えて三相不平衡補償を高速高精度に行うための自励式SVCの構成について述べる。

(2) 主回路構成と特徴

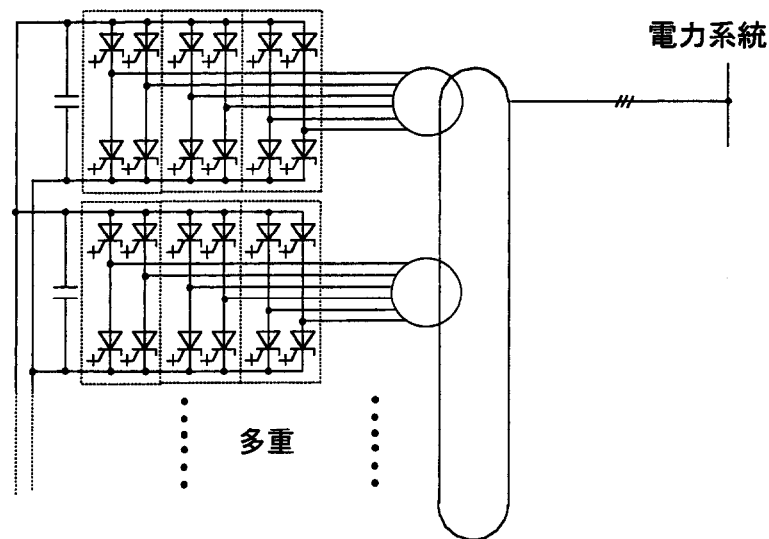


図4. 10 主回路構成

図4. 10に、対象とする自励式SVCの主回路構成を示す。主変換器はGTOなどの自己消弧デバイスを用いた電圧形インバータとして、大容量化に適すると共に、不平衡補償のための各相個別電圧制御が容易な単相ブリッジ3台による三相方式とする。これを所要容量に応じて多重変圧器により多重接続して用いる。また、出力電圧制御を行うPWMは、変換効率を優先させると、少ないパルスのPWMが良く、ここでは3パルスPWMを採用するものとした。このPWMの様子を6多重インバータの出力電圧波形として図4. 11に示す。

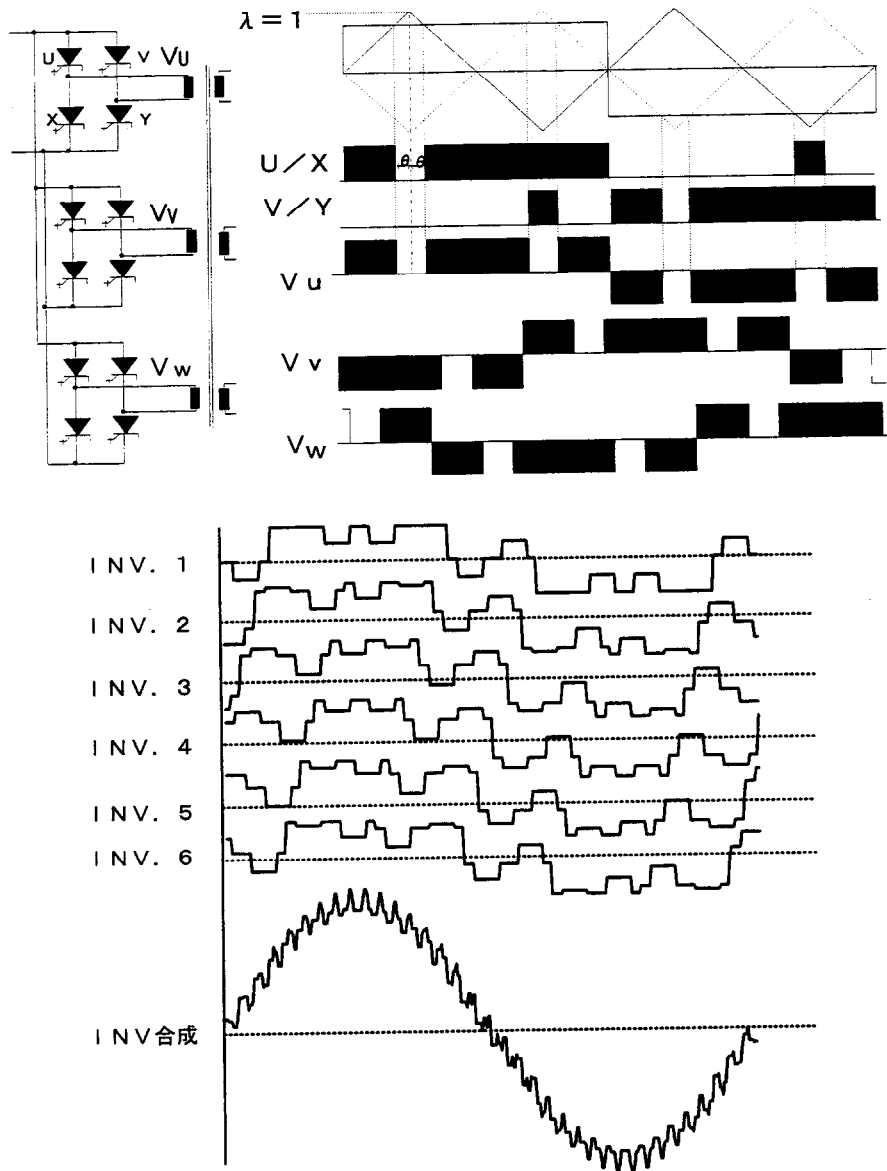


図4. 11 3パルスPWMと6多重出力電圧波形

ここで、不平衡補償を行う場合、変換器直流側のコンデンサは補償装置が逆相出力した際に発生する2倍調波のリプル電流を許容できなくてはならないことが特徴となる。このリプル電流所要値は概略下式から求めることができる。

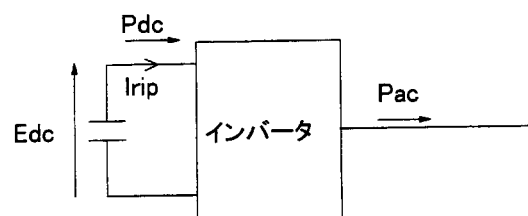


図4. 12 変換器直流リプル電流

ここでは、補償装置はその全装置容量で不平衡補償のみを行うものとする。この時以下の関係式が求められる。

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

系統電圧（三相平衡と仮定）を下式で表わす。

$$\begin{aligned} V_u &= \sqrt{2}V \sin \omega t \\ V_v &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_w &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

補償装置出力電流は全て不平衡補償しているものとして、100%逆相電流とする。

$$\begin{aligned} I_u &= \sqrt{2}I_N \sin(\omega t - \theta_N) \\ I_v &= \sqrt{2}I_N \sin(\omega t - \theta_N + \frac{2\pi}{3}) \\ I_w &= \sqrt{2}I_N \sin(\omega t - \theta_N + \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

従って補償装置の瞬時出力電力 p は下式となる。

$$\begin{aligned} p &= V_u I_u + V_v I_v + V_w I_w \\ &= 2 V I_N \left\{ \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \theta_N) + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin(\omega t - \theta_N + \frac{2\pi}{3}) \right. \\ &\quad \left. + \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \cdot \sin(\omega t - \theta_N + \frac{4\pi}{3}) \right\} \\ &= -3V I_N \cos(2\omega t - \theta_N) \end{aligned} \quad (4.16)$$

以上より振幅 $3 V I_N$ 周波数 2ω の交流脈動電力となる。

インバータの直流コンデンサにはこの電力が流入，流出する。そこで、これに伴う直流コンデンサの脈動電流 I_c は下式により求められる。

$$I_c = \frac{p}{E_{dc}} \quad (4.17)$$

(E_{dc} : 直流コンデンサ電圧)

いま、 E_{dc} はほぼ一定に保たれているとすると（一般のインバータ設計では直流電圧変動はリップル分を含めて5～10%以下となるように設計される。）

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{-3V I_N \cos(2\omega t - \theta_N)}{E_{dc}} \\ &= -\frac{S}{E_{dc}} \cos(2\omega t - \theta_N) \end{aligned} \quad (4.18)$$

ここで $S = 3V I_N$ （装置出力定格容量）

となり、この式からコンデンサに必要な定格電流を求めることができる。また、この電流と許容直流電圧変動から必要な静電容量が求められる。

また、交流出力側には他の連系インバータと同様に高調波フィルタを設置し、インバータの発生する高調波が系統へ流出する事を抑制する。このフィルターは負荷の平均力率が遅れの場合には、必要に応じて、フィルター自身に進相容量を持たせた運用を行い、変換装置容量を低減することも可能である。

4. 3. 2 制御^{(48) (49) (50)}

(1) 原理

本制御装置は補償する負荷電流から正相無効電流と逆相電流を抽出し、これらを制御指令とし、また同様に装置出力電流も正相分と逆相分の分離演算して制御の検出値とし、電流フィードバック制御を行う。図4. 13に制御の原理構成図を示す。

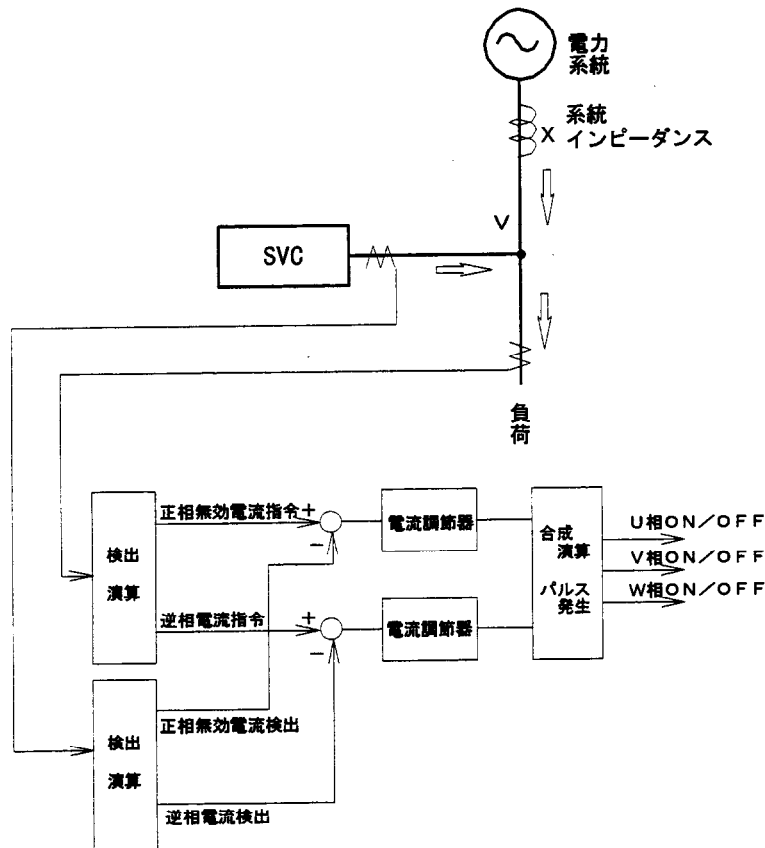


図4. 13 制御の基本原理図

(2) 制御系の全体構成

図4. 14に今回考案した不平衡補償機能付き自励式SVC制御装置の全体構成を示す。

本制御装置は、補償すべき負荷電流 I_L を正相成分と逆相成分に分離演算し、これらを制御指令値とする。同様に装置出力電流（補償電流） I_i も分離演算して検出値とする。そしてこれらを正相・逆相それぞれ個別の電流調節器（ACR）に与えてフィードバック制御を行う。

この制御系は大別して①検出演算部、②正相・逆相電流制御部、③パルス演算部及び④パルス分配部から構成される。まず検出演算部では、検出した電流、電圧から回転座標変換による正相・逆相演算によって、正相と逆相それぞれに対する2軸成分を導く。正相・逆相電流制御部は正相と逆相の2軸量に対する電流調節器を主体に構成されるが、ここでは過渡応答時において、正相及び逆相の d/q 2軸電流成分をそれぞれ分離、独立して制御するために、2軸非干渉制御を採用している。パルス演算部は正相・逆相各々2軸電圧成分で与えられた電圧指令から、出力すべき3相電圧の振幅と位相に相当する制御率 λ と制御位相 ϕ を導出する。そして後段のパルス分配部では各相個別の λ と ϕ から矩形波/三角波変調の3パルスPWMにより、GTOの点弧パルスを発生する。

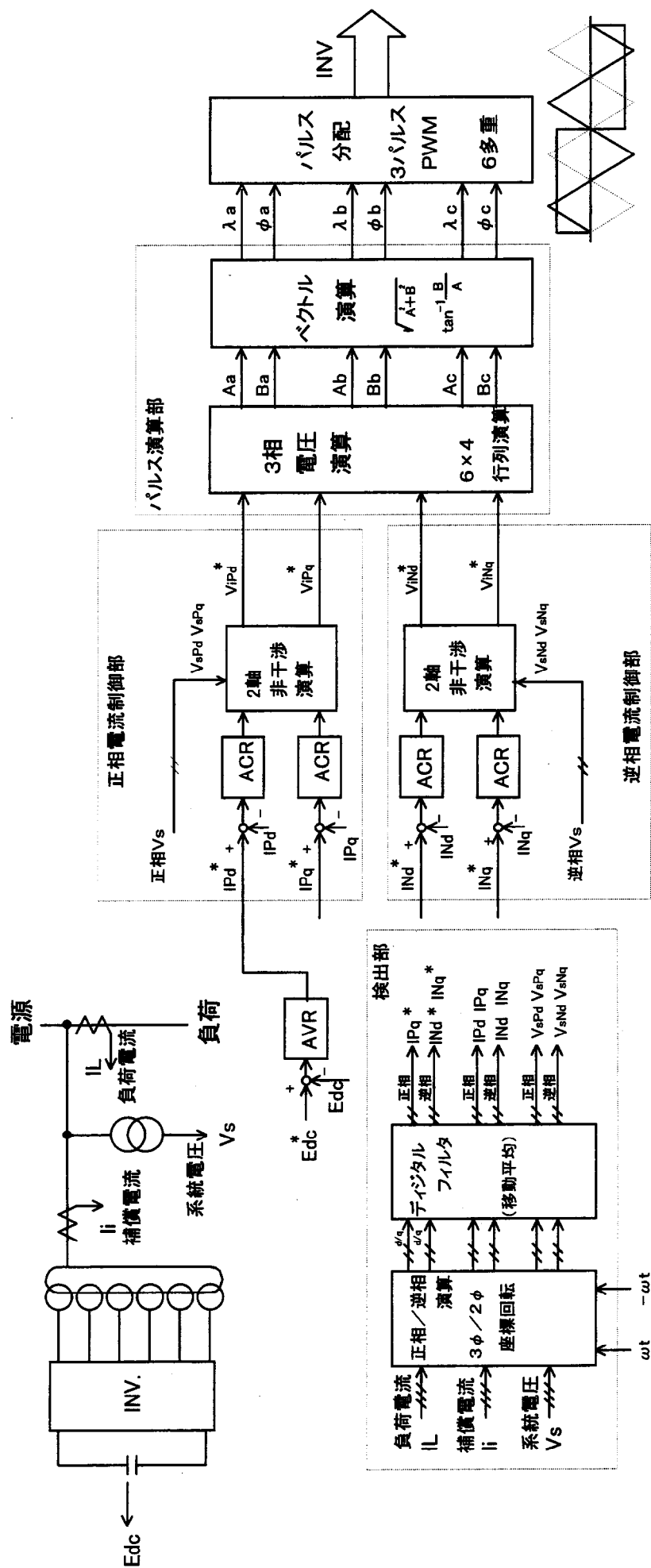


図4. 14 不平衡制御の全体構成

以下では、この正相・逆相電流補償制御の中心機能となる正相・逆相電流検出演算、2軸非干渉制御、パルス演算について詳述する。

(3) 正相、逆相電流検出

負荷電流と補償電流は、以下の演算により正相及び逆相に対する2軸電流成分に分離される。

まず各電流は、零相分が存在しないものとし、下式のように表されるものとする。

$$\begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \{ I_{Pn} \cos(n\omega t + \theta_{Pn}) + I_{Nn} \cos(n\omega t + \theta_{Nn}) \} \\ \sum \{ I_{Pn} \cos(n\omega t + \theta_{Pn} - 2\pi/3) + I_{Nn} \cos(n\omega t + \theta_{Nn} + 2\pi/3) \} \\ \sum \{ I_{Pn} \cos(n\omega t + \theta_{Pn} - 4\pi/3) + I_{Nn} \cos(n\omega t + \theta_{Nn} + 4\pi/3) \} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

(n=1, 2, 3, ...))

I_{Pn}, θ_{Pn} : n次正相電流振幅, 位相

I_{Nn}, θ_{Nn} : n次逆相電流振幅, 位相

正相及び逆相それぞれの d/q 2軸電流は次式より求める。

正相変換：

$$\begin{bmatrix} I_{Pd} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} = [C2] \cdot [C1] \cdot \begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

逆相変換：

$$\begin{bmatrix} I_{Nd} \\ I_{Nq} \end{bmatrix} = [C3] \cdot [C1] \cdot \begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

上記において

$$[C1] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

正相変換行列：

$$[C2] = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\cos \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

逆相変換行列：

$$[C3] = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

(4.19)～(4.24)式より(4.25), (4.26)式が得られる。

正相により求められる2軸電流成分：

$$\begin{bmatrix} I_{Pd} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sum [I_{Pn} \cos\{(n-1)\omega t + \theta_{Pn}\} + I_{Nn} \cos\{(n+1)\omega t + \theta_{Nn}\}] \\ \sum [I_{Pn} \sin\{(n-1)\omega t + \theta_{Pn}\} - I_{Nn} \sin\{(n+1)\omega t + \theta_{Nn}\}] \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

逆相変換により求められる2軸電流成分：

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

$$\begin{bmatrix} I_{Nd} \\ I_{Nq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sum [I_{Pn} \cos\{(n+1)\omega t + \theta_{Pn}\} + I_{Nn} \cos\{(n-1)\omega t + \theta_{Nn}\}] \\ \sum [I_{Pn} \sin\{(n+1)\omega t + \theta_{Pn}\} - I_{Nn} \sin\{(n-1)\omega t + \theta_{Nn}\}] \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

ここで、電流が対称波で偶数調波が無視できるとすると、 $n=1, 3, 5 \dots$ となり、式を更にまとめて、下式が得られる。

正相変換による2軸電流成分：

$$\begin{bmatrix} I_{Pd} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} I_{P1} \cos \theta_{P1} + [\tilde{I}_{Pd}] \\ I_{P1} \sin \theta_{P1} + [\tilde{I}_{Pq}] \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

逆相変換による2軸電流成分：

$$\begin{bmatrix} I_{Nd} \\ I_{Nq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} I_{N1} \cos \theta_{N1} + [\tilde{I}_{Nd}] \\ -I_{N1} \sin \theta_{N1} + [\tilde{I}_{Nq}] \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

上式中、 $[\tilde{I}_{Pd}]$ 、 $[\tilde{I}_{Pq}]$ 、 $[\tilde{I}_{Nd}]$ 、 $[\tilde{I}_{Nq}]$ は、いずれも角周波数 $2m\omega$ ($m=1, 2, 3 \dots$) の周期関数の和を表す。

これより正相・逆相変換により求めた各2軸成分は、直流成分と基本波の2m倍調波成分とで表されることが分かる。本制御では、このうちで正相及び逆相電流の基本波成分が制御の対象であり、すなわち各2軸電流の直流成分が制御対象となる。そこで(4.27)(4.28)式で示される検出信号を、更に基本波半周期の移動平均フィルタに入力して2m倍調波成分を除去して制御信号を得る。

以上の演算に基づき、負荷電流と補償電流の検出から、正相・逆相それぞれの電流調節器(ACR)の指令値と検出値を直流量として求めてフィードバック制御が行われる。これにより、ACRの調整が簡易となり、また定常状態の制御偏差を極小にすることが容易となる。

(4) 2軸非干渉制御

系統連系インバータシステムにおける有効電力と無効電力の高速、安定化制御の手法としてP-Q非干渉制御方式がある⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾。本装置では、この手法を正相及び逆相各々のd/q2軸電流成分に対して適用することとした。以下においては、この正相・逆相系における2軸非干渉制御手法について述べる。

図4.15は系統連系インピーダンスをLとrで表した系統インバータシステムの3相モデルである。具体的には、Lは連系リアクトルや出力変圧器のインダクタンスであり、rはこれらを含めた変換装置の損失分に相当する。

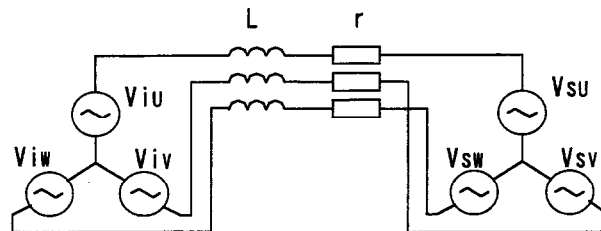


図4.15 系統連系インバータシステムの3相モデル

この電圧、電流及びインピーダンスを以下とする。

$$\text{インバータ電圧: } \mathbf{V}_i = [V_{iu}, V_{iv}, V_{iw}]' \quad (4.29)$$

$$\text{系統電圧: } \mathbf{V}_s = [V_{su}, V_{sv}, V_{sw}]' \quad (4.30)$$

$$\text{出力電流: } \mathbf{I} = [I_u, I_v, I_w]' \quad (4.31)$$

$$\text{系統インピーダンス: } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} sL + r & 0 & 0 \\ 0 & sL + r & 0 \\ 0 & 0 & sL + r \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

とすれば、図4. 15のモデルは次の関係式で表される。

$$\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_s = \mathbf{Z} \mathbf{I} \quad (4.33)$$

ここで、(4.20)～(4.24)式を用いて電圧と電流を、正相・逆相の2軸成分へ変換すると以下になる。

正相変換:

$$\begin{bmatrix} V_{ipd} \\ V_{ipq} \end{bmatrix} = [C2][C1] \mathbf{V}_i \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} V_{spd} \\ V_{spq} \end{bmatrix} = [C2][C1] \mathbf{V}_s \quad (4.35)$$

$$\begin{bmatrix} I_{pd} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = [C2][C1] \mathbf{I} \quad (4.36)$$

逆相変換:

$$\begin{bmatrix} V_{ind} \\ V_{inq} \end{bmatrix} = [C3][C1] \mathbf{V}_i \quad (4.37)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sNd} \\ V_{sNq} \end{bmatrix} = [C3][C1] \mathbf{V}_s \quad (4.38)$$

$$\begin{bmatrix} I_{Nd} \\ I_{Nq} \end{bmatrix} = [C3][C1] \mathbf{I} \quad (4.39)$$

また、インピーダンスは正相系、逆相系各々以下となる。

$$\mathbf{Z}_P = [C2][C1] \mathbf{Z} [C1]' [C2]' \quad (4.40)$$

$$\mathbf{Z}_N = [C3][C1] \mathbf{Z} [C1]' [C3]' \quad (4.41)$$

以上より、回転座標系における正相、逆相の系統連系システムの関係式は以下となる。

正相系:

$$\begin{bmatrix} V_{ipd} \\ V_{ipq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL + r & -\omega L \\ \omega L & sL + r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pd} \\ I_{pq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{spd} \\ V_{spq} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

逆相系:

$$\begin{bmatrix} V_{ind} \\ V_{inq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL + r & \omega L \\ -\omega L & sL + r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Nd} \\ I_{Nq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sNd} \\ V_{sNq} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

上記の制御対象に対し、正相、逆相各々の d / q 2 軸間の非干渉化を果たす制御系は図 4. 1 6, 図 4. 1 7 となる。

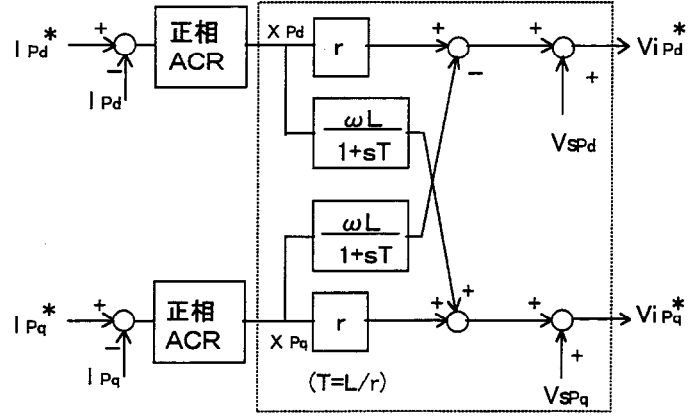


図 4. 1 6 正相非干渉制御ブロック図

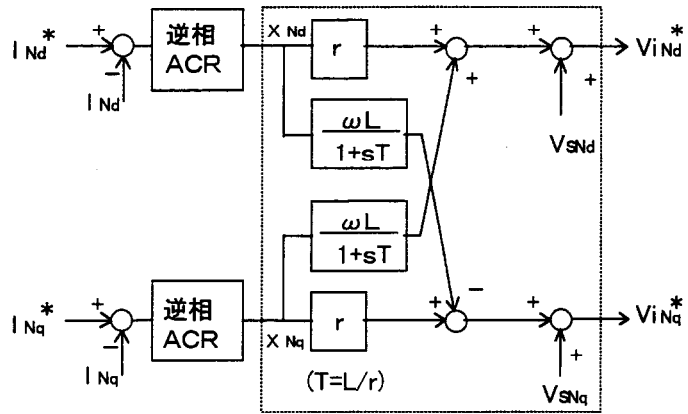


図 4. 1 7 逆相非干渉制御ブロック図

これらのブロック図において、点線で囲んだ部分が、系統連系インピーダンスを考慮して構成した非干渉演算部である。

この構成によれば、ACRの伝達関数を $G_1(s)$ として、例えば正相電流制御において制御系内の関係式は以下となる。

$$\begin{bmatrix} V_{iPd}^* \\ V_{iPq}^* \end{bmatrix} = G_1(s) \begin{bmatrix} r & \frac{-\omega L}{1+sT} \\ \frac{\omega L}{1+sT} & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Pd}^* - I_{Pd} \\ I_{Pq}^* - I_{Pq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{SPd} \\ V_{SPq} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

そして、前記(4.42)式に基づき $[V_{iPd}, V_{iPq}]^T = [V_{iPd}^*, V_{iPq}^*]^T$ として整理すると

$$\begin{bmatrix} I_{Pd} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} = \frac{G_1(s)}{1+sT+G_1(s)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Pd}^* \\ I_{Pq}^* \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

となる。これより、d/q 軸の非対角要素が零となって非干渉化が達成されることが分かる。逆相系も同様である。

以上の2軸非干渉方式を用いる事により、正相・逆相各々のd/q 2軸成分を分離、独立して制御する事ができ、過渡状態においても高速・安定な制御が可能となる。

(5) パルス演算

電流制御部で得られた正相・逆相2軸の出力電圧目標値 V_{iPd}^* , V_{iPq}^* , V_{iNd}^* , V_{iNq}^* から、3パルスPWM制御に必要な制御率 λ と位相角 ϕ への変換は以下により行う。

いま、変換装置の出力する3相電圧が次式の通りであるとする。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{iU} \\ V_{iV} \\ V_{iW} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} |V_{iU}| \cos(\omega t + \phi_U) \\ |V_{iV}| \cos(\omega t + \phi_V - 2\pi/3) \\ |V_{iW}| \cos(\omega t + \phi_W - 4\pi/3) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} V_{iP} \cos(\omega t + \phi_P) + V_{iN} \cos(\omega t + \phi_N) \\ V_{iP} \cos(\omega t + \phi_P - 2\pi/3) + V_{iN} \cos(\omega t + \phi_N + 2\pi/3) \\ V_{iP} \cos(\omega t + \phi_P - 4\pi/3) + V_{iN} \cos(\omega t + \phi_N + 4\pi/3) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.46)$$

V_{iP} : 正相電圧振幅 ϕ_P : 正相電圧位相

V_{iN} : 逆相電圧振幅 ϕ_N : 逆相電圧位相

これより以下の関係式が得られる。

$$|V_{iU}| = \sqrt{A_U^2 + B_U^2}, \quad \phi_U = \tan^{-1} B_U / A_U \quad (4.47)$$

$$\begin{cases} A_U = V_{iP} \cos \phi_P + V_{iN} \cos \phi_N \\ B_U = V_{iP} \sin \phi_P + V_{iN} \sin \phi_N \end{cases} \quad (4.48)$$

$$|V_{iV}| = \sqrt{A_V^2 + B_V^2}, \quad \phi_V = \tan^{-1} B_V / A_V \quad (4.49)$$

$$\begin{cases} A_V = V_{iP} \cos \phi_P + V_{iN} \cos(\phi_N - 2\pi/3) \\ B_V = V_{iP} \sin \phi_P + V_{iN} \sin(\phi_N - 2\pi/3) \end{cases} \quad (4.50)$$

$$|V_{iW}| = \sqrt{A_W^2 + B_W^2}, \quad \phi_W = \tan^{-1} B_W / A_W \quad (4.51)$$

$$\begin{cases} A_W = V_{iP} \cos \phi_P + V_{iN} \cos(\phi_N - 4\pi/3) \\ B_W = V_{iP} \sin \phi_P + V_{iN} \sin(\phi_N - 4\pi/3) \end{cases} \quad (4.52)$$

また、前述の演算により出力電圧の正相・逆相各2軸成分は下式の通りとなる。

$$\begin{bmatrix} V_{iPd} \\ V_{iPq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_{iP} \cos \phi_{Pi} \\ V_{iP} \sin \phi_{Pi} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\begin{bmatrix} V_{iNd} \\ V_{iNq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_{iN} \cos \phi_{Ni} \\ -V_{iN} \sin \phi_{Ni} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

以上(4.48)(4.50)(4.52)式と(4.53)(4.54)式より(4.55)式が得られる。

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

$$\begin{bmatrix} A_U \\ B_U \\ A_V \\ B_V \\ A_W \\ B_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 1 & -\sqrt{3}/2 & 1/2 \\ 1 & 0 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 0 & 1 & \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{iPd} \\ V_{iPq} \\ V_{iNd} \\ V_{iNq} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

一方制御系では、電流制御部により出力電圧目標値の正相・逆相2軸成分 V_{iPd}^* , V_{iPq}^* , V_{iNd}^* , V_{iNq}^* が与えられ、これから実際のPWMに用いる制御信号として(4.56)式で示される制御率 λ と位相角 ϕ を求めることになる。

$$\begin{bmatrix} V_{iU}^* \\ V_{iV}^* \\ V_{iW}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_U \cos(\omega t + \phi_U) \\ \lambda_V \cos(\omega t + \phi_V - 2\pi/3) \\ \lambda_W \cos(\omega t + \phi_W - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

以上より、図4.18に示すパルス演算部の制御ブロックが導かれる。

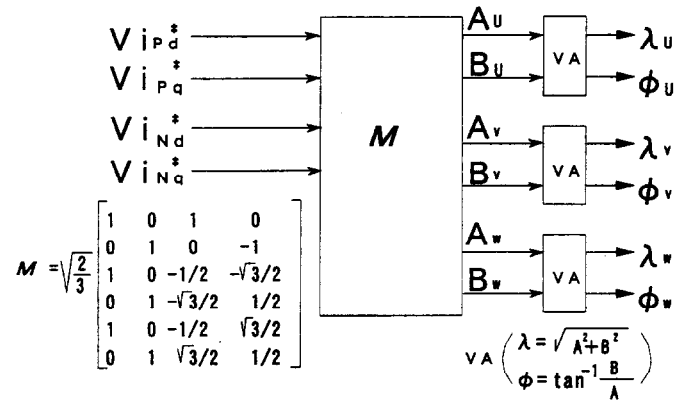


図4.18 パルス演算の回路構成図

4.3.3 試験結果⁽⁶³⁾

以上の制御アルゴリズムに基づくDDCシステムを実験装置と組合せ、評価試験を行った。

図4.19実験装置の構成と概略仕様を示す。本装置は、単相×3相インバータ6組を、10度づつ位相差をつける移相巻線付きインバータトランスにより多重結合させた36相インバータ構成をしており、20kVAの容量を持つ。また、今回は、補償対象の平均力率が遅れの場合を想定し、進相容量14kVAのフィルタを設けた実験を行った。以下に試験結果の代表例を示す。

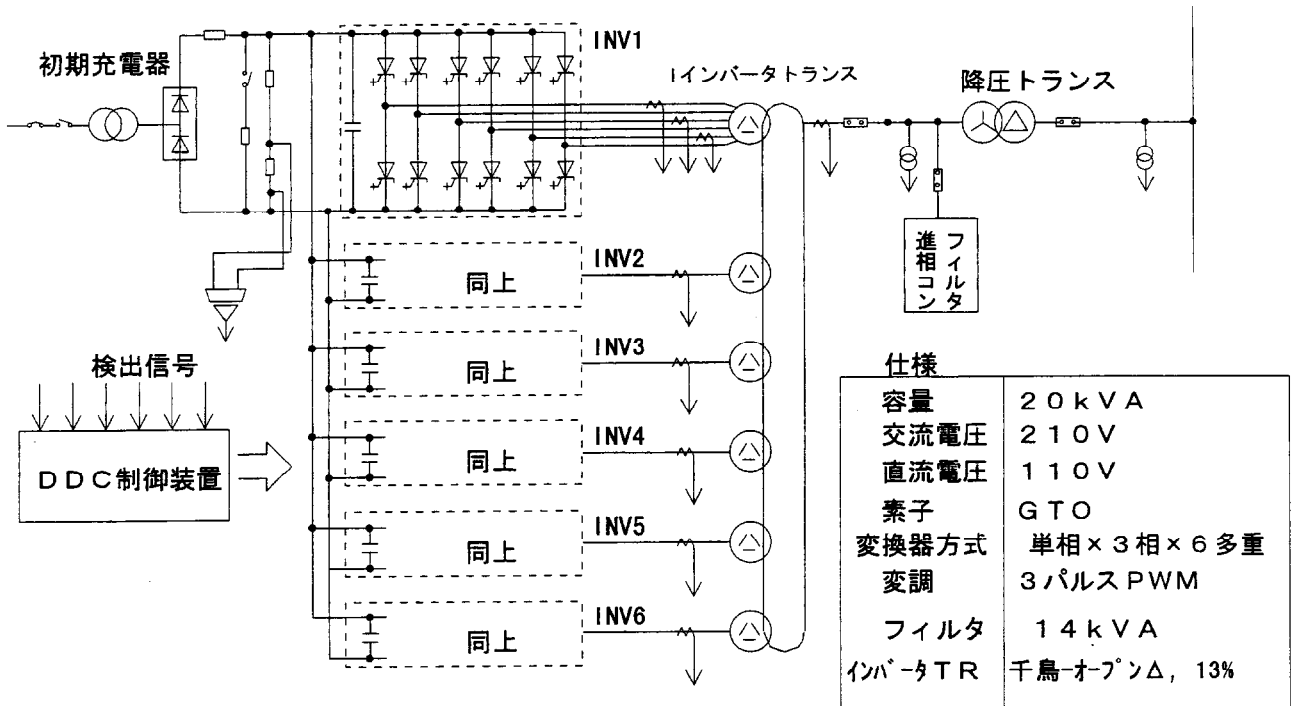


図4. 19 自励式SVC実験装置

(1) 出力電圧波形

本装置は、起動時、系統に対して同期投入方式により連系する。図4. 20は連系前のSVC単独運転時の出力電圧波形である。3パルスPWMの36相多重化によって、フィルタ無しでも総合歪み6.9%の低高調波出力を実現している。なお、これを系統と連系したときの出力電流高調波は、同様にフィルタ無しの条件で総合2%以下となる。

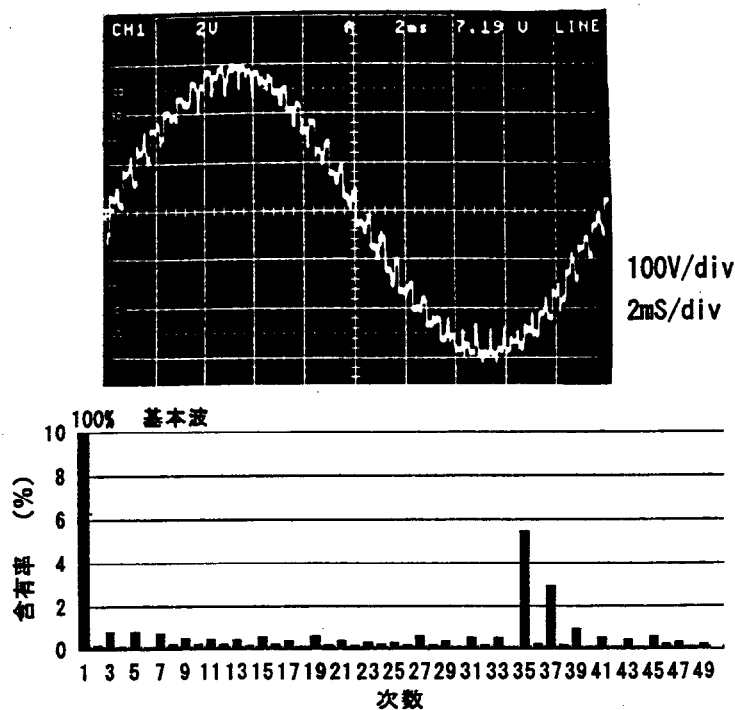


図4. 20 自励式SVC出力電圧波形（単独運転時 100V/div）

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

(2) 静特性

図4. 21に外部設定として、逆相d軸指令（他はすべて零設定）を入力したときの出力電流測定値を理論値と共に示す。この場合制御誤差は2%以内の結果となっている。

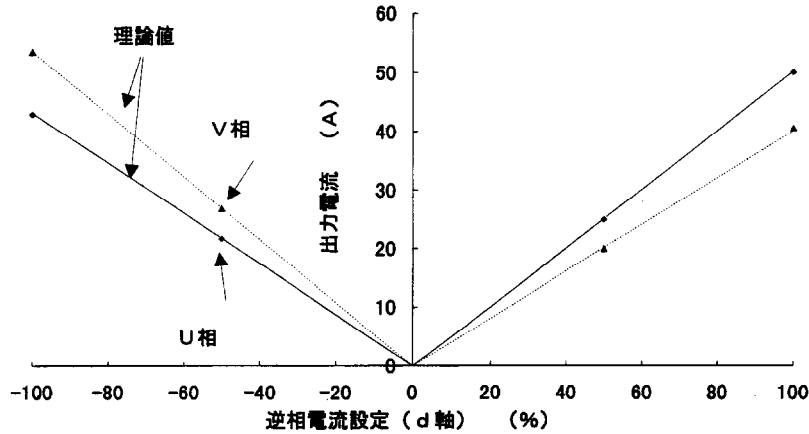


図4. 21 逆相分静特性試験結果

表4. 4は、系統に三相平衡LR負荷又は、スコット変圧器を介して単相LR負荷を変圧器のT座に接続し、これの取る無効電流と逆相電流を自励式SVGで補償した時の測定結果である。補償精度の評価は、無効電力と逆相電力を取る負荷を接続した際に、系統側に流れる正相無効電流と逆相電流の補償比率として下記の定義により行った。

$$\text{正相無効電流補償率} = \frac{I_{Lp} - I_{Sp}}{I_{Lp}} \times 100 (\%) \quad (4.57)$$

$$\text{逆相電流補償率} = \frac{I_{Ln} - I_{Sn}}{I_{Ln}} \times 100 (\%) \quad (4.58)$$

$$\text{補償誤差} = 100 (\%) - \text{各補償率} \quad (4.59)$$

ここで I_{Lp} : 負荷正相無効電流

I_{Sp} : 系統正相無効電流

I_{Ln} : 負荷逆相電流

I_{Sn} : 系統逆相電流

これより、平衡／不平衡負荷にかかわらず補償誤差は3%以内となっていることが分かる。

表4. 4 補償精度評価結果

		3相平衡負荷		単相負荷 T座のみ	
負荷	L (kVA)	5	10	5	10
	R (kW)	5	6	5	9
負荷側	無効電流 (A)	32.2	60.8	16.8	32.0
	逆相電流 (A)	1.2	1.7	20.2	38.5
SVG出力	無効電流 (A)	32.7	60.8	18.0	32.3
	逆相電流 (A)	1.2	1.9	19.3	38.1
系統側	無効電流 (A)	1.2	1.1	0.4	0.5
	逆相電流 (A)	0.4	0.2	0.3	0.5
補償誤差	無効電流 (%)	2.5	2.4	0.8	1.1
	逆相電流 (%)	0.9	0.5	0.6	1.1

(3) 設定急変

図4.22, 図4.23はそれぞれ、正相無効電流と逆相q軸電流の設定急変試験結果である。設定変化幅は、応答速度評価のために、いずれも30%の比較的小ステップとし、この時の交流出力電流と、その正相・逆相の2軸電流成分の応答波形を示している。

図10より正相ステップ時において、応答速度約15ms, 2軸間干渉5%（入力ステップ30%に対して）となっていることが分かる。

また逆相出力に対しては、本質的にこれが直流電圧脈動を発生させることや、各相不平衡電圧出力をしたときにインバータトランスの移相巻線により相間干渉が生ずることなどを考慮して、その制御ゲインを正相に対し約20%低く設定している。このため図11より分かるように、逆相ステップ応答は約25msとなっている。ただし、2軸間干渉についてはこの場合も5%が確保されている。

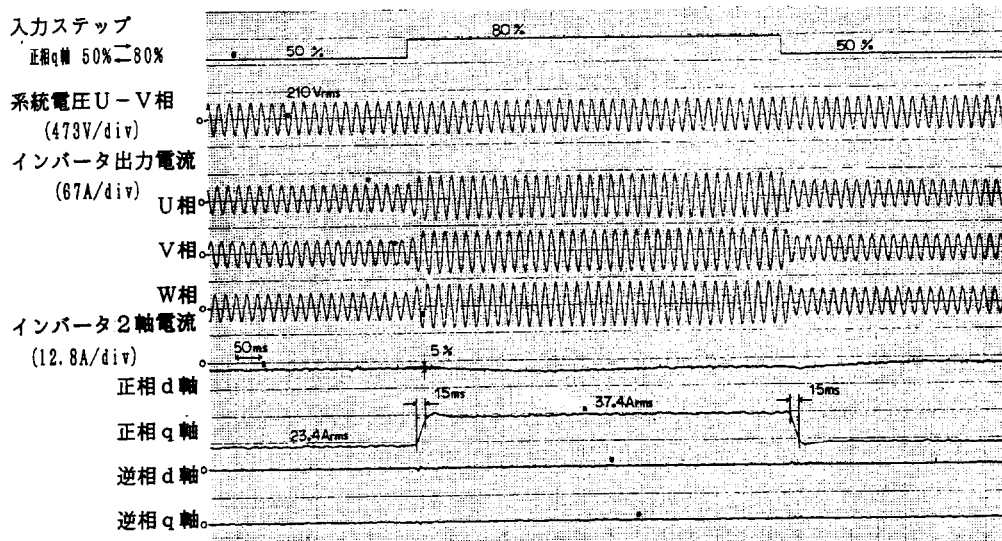


図4.22 正相無効電流のステップ応答結果

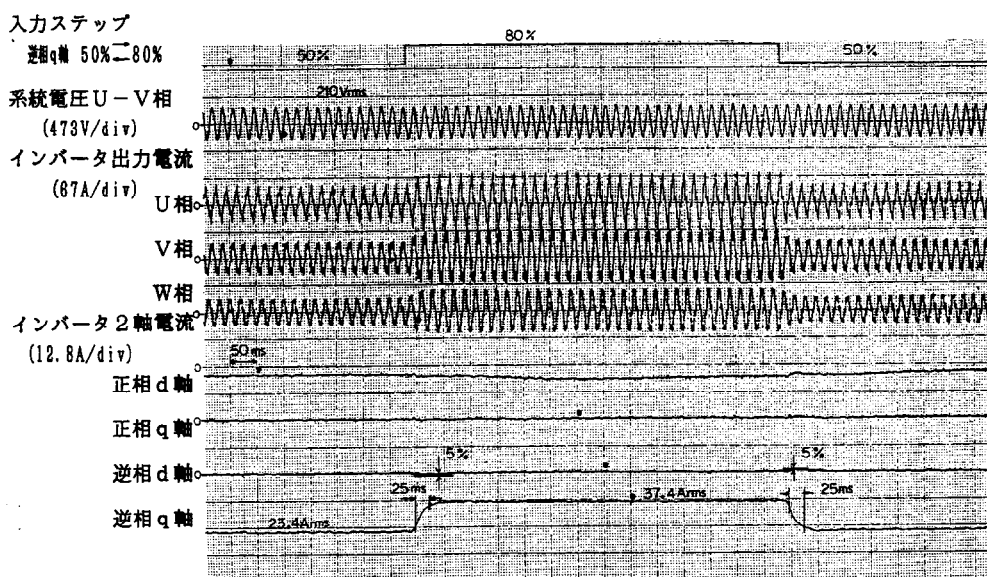


図4.23 逆相無効電流のステップ応答結果

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

(4) 負荷急変

補償動作中の過渡応答試験結果の一例を図4. 24に示す。この場合、自励式SVC (SVG) の有る場合と無い場合とで、単相リアクトルの投入、解放を行った場合の、負荷電流、補償電流 (自励式SVC電流) と、系統電流、電圧を表している。これより、本装置により、約25ms～30msの応答時間で負荷の取る正相無効分と不平衡分が補償されていることが分かる。

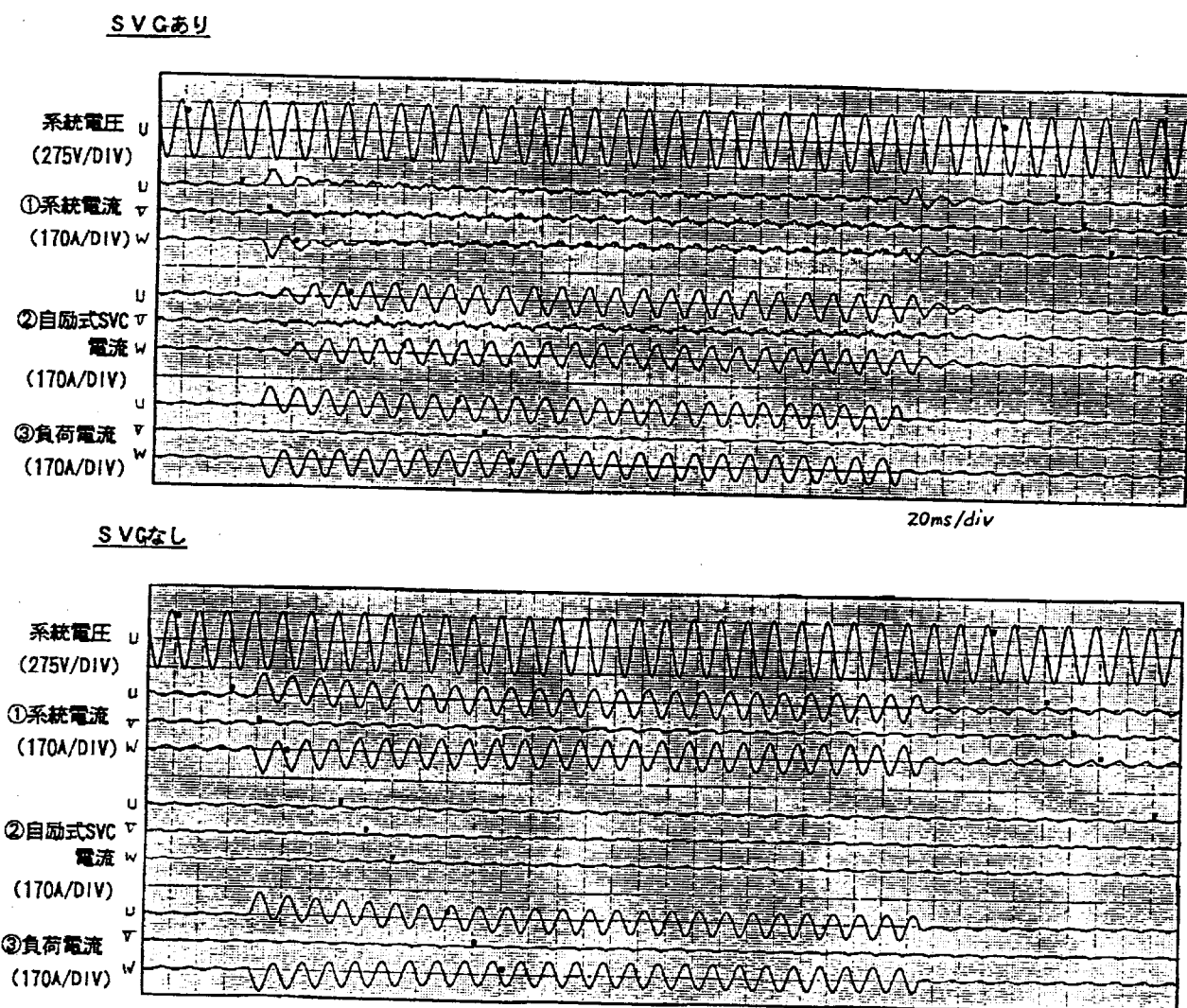


図4. 24 負荷急変試験結果

4. 3. 4 応用⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾

大容量電力系統補償装置において不平衡補償を実現するための新しい制御方式を示した。この制御方式を実際の補償装置に適用しその性能をフィールドにて確認した。図4. 25に装置を設置した系統全体構成を示す。本システムでは、電鉄負荷が発生する電圧変動と不平衡電圧の補償を目的としている。

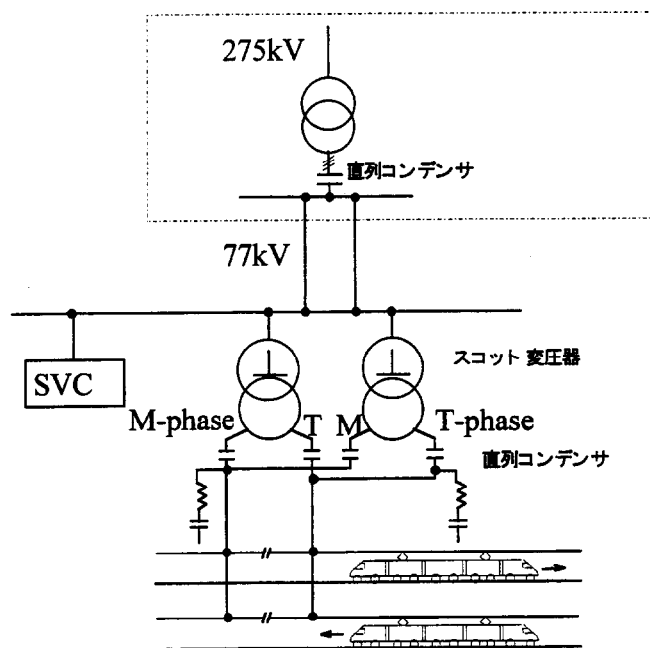


図 4. 25 電鉄用不平衡補償装置の実用システム例

図4. 26は不平衡補償機能を持つ自励式SVC実機の仕様と構成である。

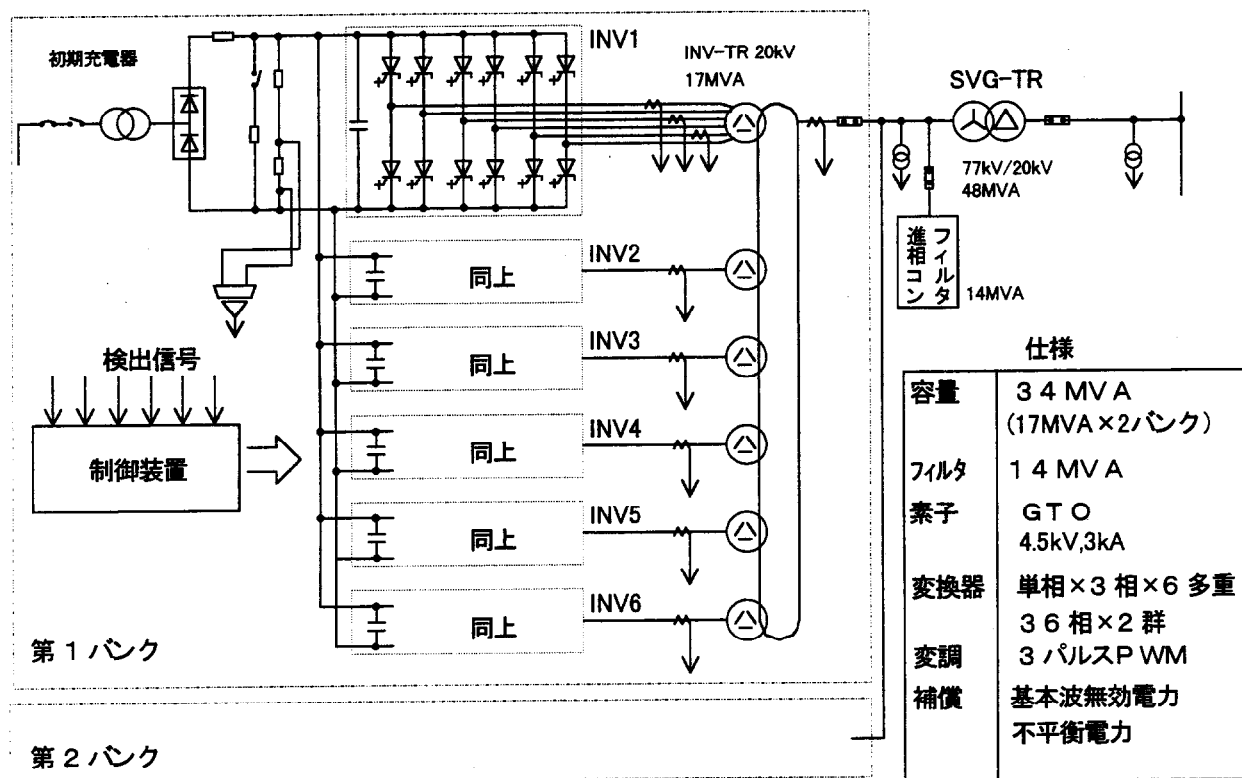


図4.26 装置構成と仕様

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

図4. 27は現地試験データの一例である。この試験は、実負荷時において自励式SVCを停止状態から、運転させたときの規制点（275kV）電圧変動を測定したものである。これより前述の理論通り、装置容量内で所期の不平衡補償動作の行えていることが分かる。

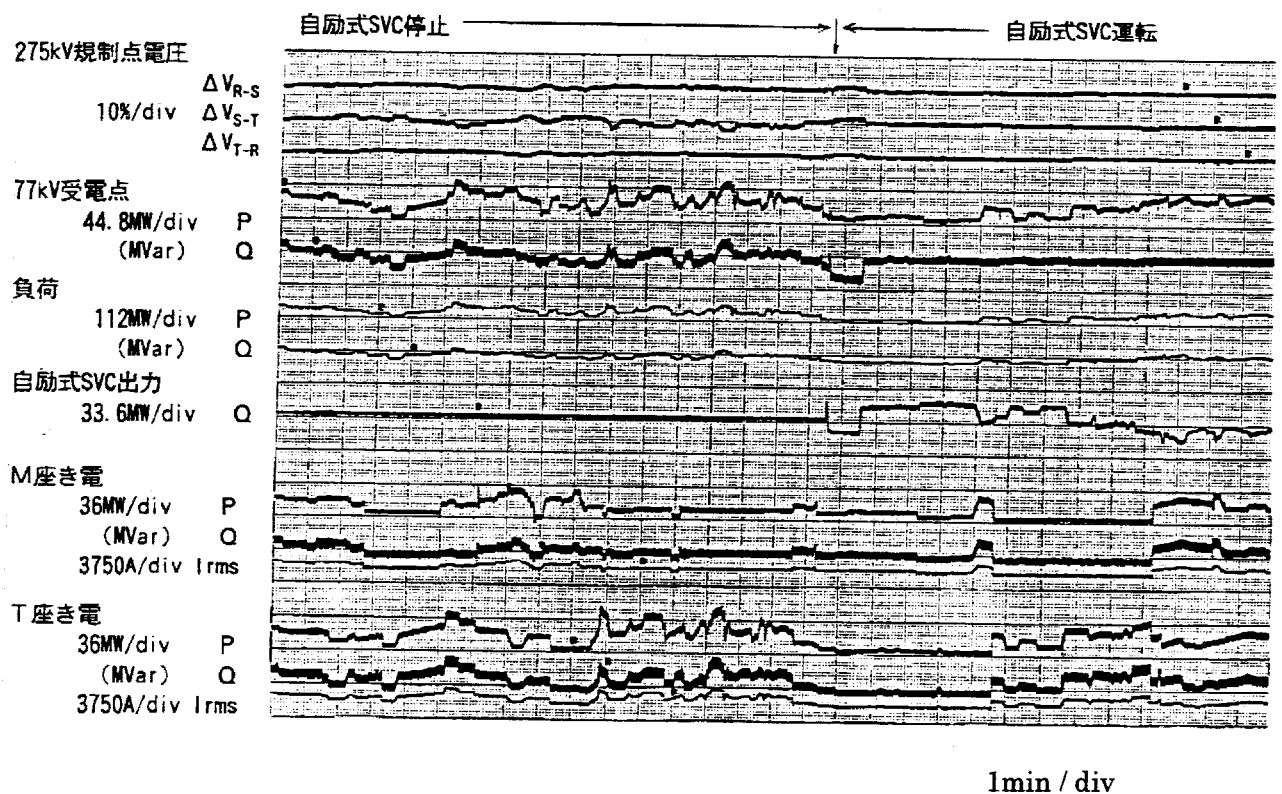


図4. 27 フィールド試験結果

4. 4 電圧動揺補償機能（フリッカ補償機能）の開発

自励式SVCが、他励式SVCに比べて大幅な高速応答性を有することについて4. 2節で述べた。本節では、この高速制御性能を活かした電力系統の電圧動揺（フリッカ）補償制御について述べる。

4. 4. 1 装置の概要

大容量負荷のランダムな変動は、系統電圧の動揺を引き起こし、この結果照明のちらつき（フリッカ）などの問題が生ずる。この電圧動揺を抑制するための補償装置は、数ms～10ms以下の高速応答性のが要求され、その応答性能が補償装置の補償率を大きく左右すると言える。このため、変換回路方式としては、自励式インバータによる高周波PWMを行うことが望ましい。自励式の場合には、変換器を多重構成して、等価スイッチング周波数を上げることが可能である。この特性は、4. 2項でシミュレーションによる解析結果を示した通りである。

電力系統用の補償装置では、大容量が要求されるため、一般に高効率性や使用できる半導体素子のスイッチング周波数に制約があるため、単器PWM周波数の低減と、装置容量の増加をもたらす多重PWM方式を採用する場合が多い。

ここでは、各デバイスを1周期9回のPWMを行い、これを6多重（キャリア多重）構成する場合の主回路構成例と出力電圧波形を図4. 28と図4. 29図に示す。

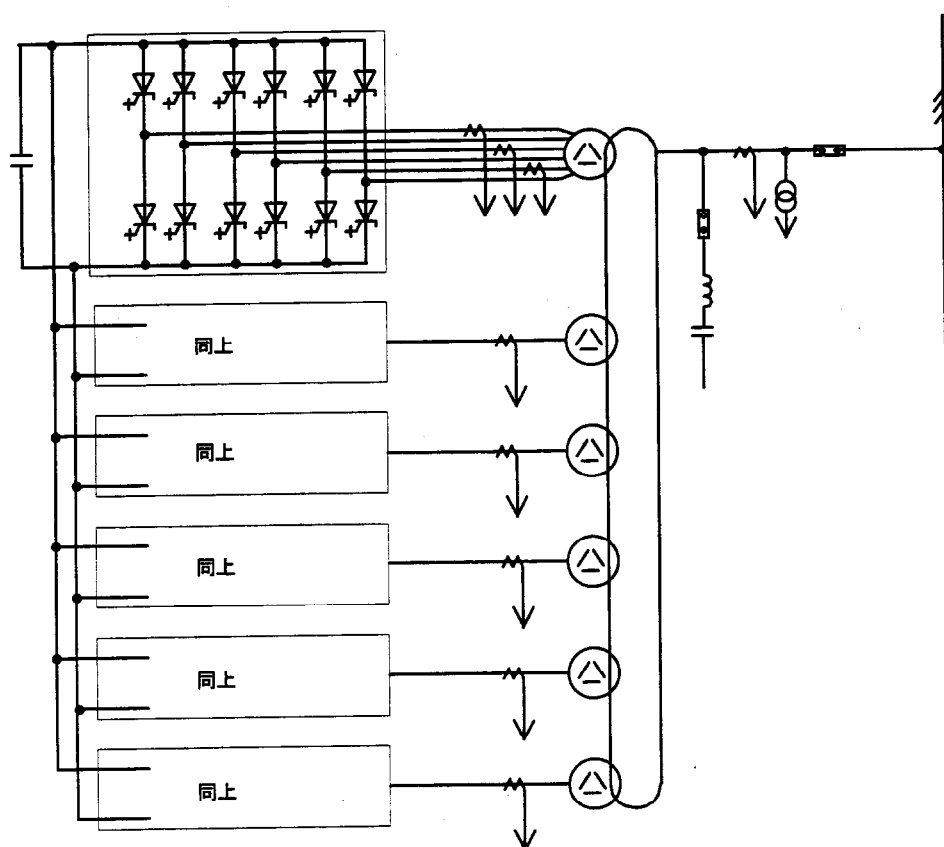


図4. 28 フリッカ補償装置の主回路構成図

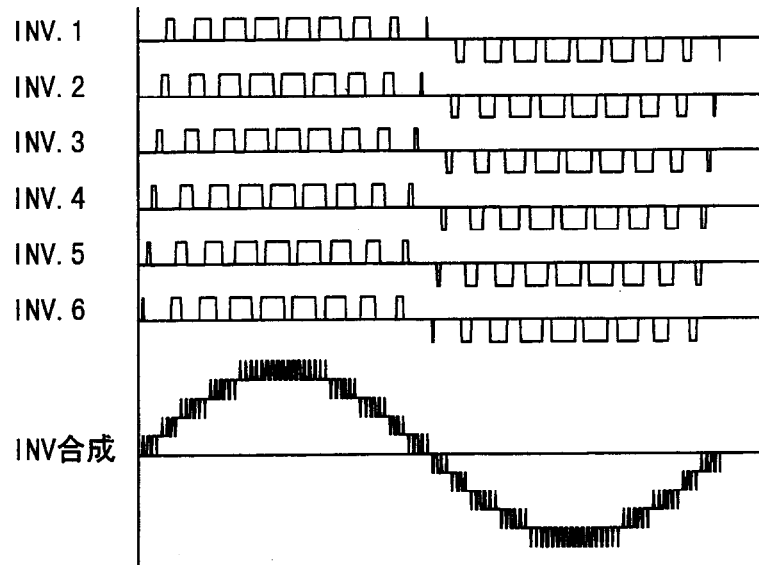


図4. 29 6多重9パルスPWMの出力電圧波形

4. 4. 2 制御⁽⁵⁸⁾

(1) 原理と要件

制御の原理構成を図4. 30に示す。

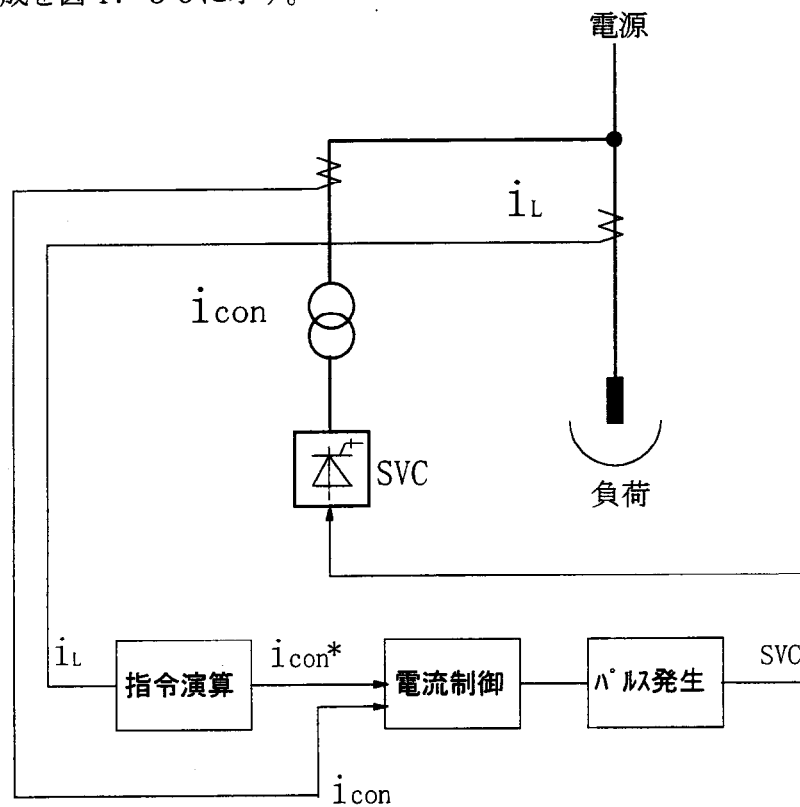


図4. 30 制御の基本構成

本制御系では、系統電圧変動を引起こす負荷の電流 i_L を検出し、これより装置で補償すべき電流成分を抽出演算する。そして、これを指令として電流制御を行う。この制御に対する要件は次の2点である。

制御の要件

- ・ 系統電圧動揺を引起こす変動電流成分の高速・高精度演算
- ・ 変動電流指令への高速追従

以下にこれらの条件を満たす制御構成を示す。

(2) 電流指令演算

系統電圧の動揺は、大型圧延機やアーク炉などの大容量変動負荷により発生する。この電圧動揺が最も身近な問題として顕在化するの、照明のちらつきいわゆるフリッカ現象である。

フリッカは1～15 Hz程度の周期の電圧変動により発生し、視感度曲線により最も不快となる10 Hz成分 ($\Delta V/10$) に換算して大きさが評価される⁽²⁷⁾。従って、補償指令は系統の電圧変動を引起こす負荷電流の変動成分を抽出して求める。

指令電流の抽出は3φ/2φ変換および、d q変換に基づく2軸変換をもとに行う。図4.31にこの構成を示す。ここでは、回転軸の基準位相は系統電圧を2軸変換して求めた空間ベクトルから求める。

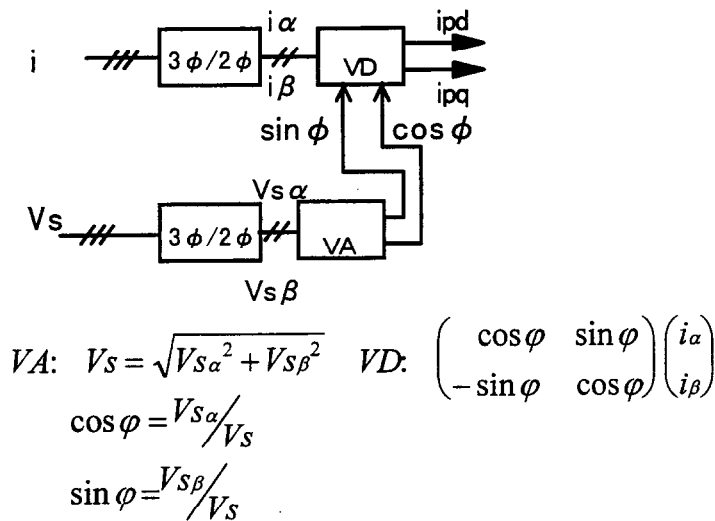


図4.31 電流の2軸変換

これより求められる i_{pd} , i_{pq} はそれぞれ概念的に以下の成分からなっているといえる。

$$i_{pd} = (\bar{i}_{pd} + \Delta \bar{i}_{pd}) + (\tilde{i}_{pd2} + \Delta \tilde{i}_{pd2}) + (\tilde{i}_{pdh} + \Delta \tilde{i}_{pdh})$$

$$i_{pq} = (\bar{i}_{pq} + \Delta \bar{i}_{pq}) + (\tilde{i}_{pq2} + \Delta \tilde{i}_{pq2}) + (\tilde{i}_{pqh} + \Delta \tilde{i}_{pqh})$$

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

ここで、各記号は以下を示している。

$\bar{i}_{pd} / \Delta \bar{i}_{pd}$: 正相基本波有効電流の 定常 / 変動成分

$\bar{i}_{pq} / \Delta \bar{i}_{pq}$: 正相基本波無効電流の 定常 / 変動成分

$\tilde{i}_{pd2} / \Delta \tilde{i}_{pd2}$: 逆相 d 軸電流の 定常 / 変動成分

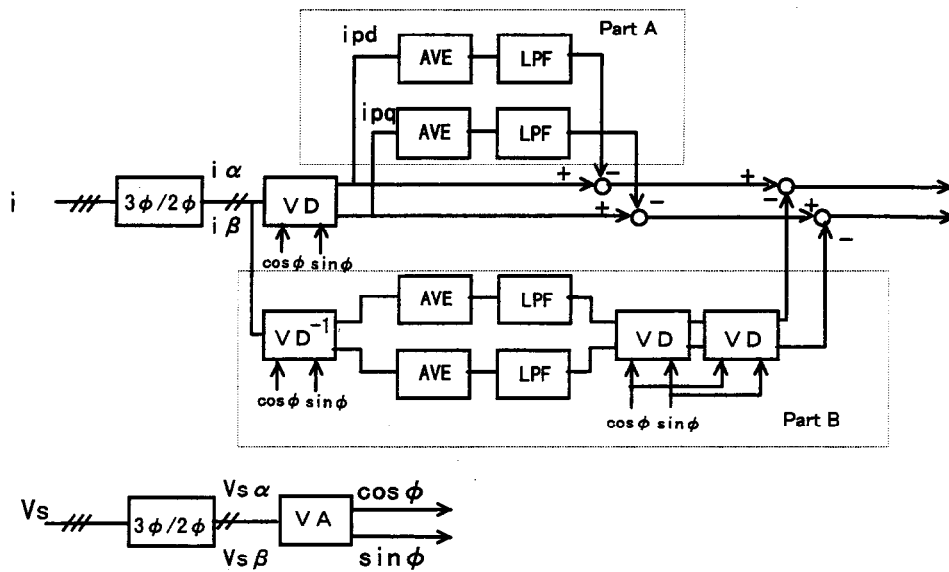
$\tilde{i}_{pq2} / \Delta \tilde{i}_{pq2}$: 逆相 q 軸電流の 定常 / 変動成分

$\tilde{i}_{pdh} / \Delta \tilde{i}_{pdh}$: 高調波 d 軸電流の 定常 / 変動成分

$\tilde{i}_{pqh} / \Delta \tilde{i}_{pqh}$: 高調波 q 軸電流の 定常 / 変動成分

フリッカに対しては、高調波は他の成分に比べて影響が低いと考え、ここでは補償対象から除外することとする。なお、フリッカの評価基準となる ΔV 10 メータでは、基本波一周期の電圧実効値の変動に 10 Hz を中心とする視感度曲線による重みづけをして測定する⁽²⁷⁾。

上記の 2 軸電流から補償すべき電流成分の抽出は図 4. 3 2 の構成によって行う。この場合、各成分の定常成分を求めこれを元信号から減算し、フリッカを引き起こす変動成分を求めている。図において、点線部 PART. A は、基本波正相電流定常成分を演算し、同 PART. B は逆相電流定常成分の演算個所である。



$$VA: V_s = \sqrt{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2}$$

$$\cos \varphi = V_{s\alpha} / V_s$$

$$\sin \varphi = V_{s\beta} / V_s$$

AVE: 基本波半周期移動平均

LPF: Low Pass Filter

$$VD: \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad VD^{-1}: \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}$$

図 4. 3 2 補償電流指令の抽出演算

ここで、高調波はこの d/q 2 軸変換した場合、以下のように $n \pm 1$ 次成分に変換される。

n 次正相成分

n - 1 次リプル成分

n 次逆相成分

n + 1 次リプル成分

従って、高調波の処理には三相交流波形で必要な抽出、除去を行う方が容易である。

このため、検出入力にバンドパスフィルタやローパスフィルタを用いることになる。この検出フィルタとして、例えば負荷側に高調波フィルタを有しているシステムでは、この高調波フィルタと補償装置とが共振しないように、主回路の高調波フィルタの共振次数に注目した特定次数の高調波除去が要求される場合がある。このような場合には、検出フィルタにフーリエ変換を適用することが効果的と考えられる。以下に離散値フーリエ変換（DFT : Discrete Fourier Transform）を適用する方法を述べる。

DFTによる高調波除去の原理構成を図4. 33に示す。本図中において点線部はN次高調波を抽出する離散値フーリエ変換と離散値逆フーリエ変換を示している。これによりN次高調波を求め、元信号からこれを減算して必要な信号波を求めるものである。

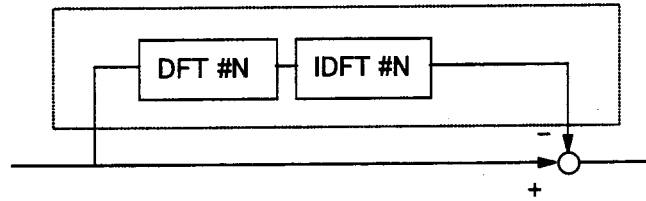


図4. 33 DFTによる高調波除去の原理

ここで、DFTにより求められる時刻 t_N における n 次スペクトラム $G(n)$ およびスペクトラム $G(n)$ から逆DFTにより求められる時刻 k の n 次成分信号は一般に以下で表される。

$$G(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) W^{nk} \quad \left(W = \exp\left(\frac{j2\pi n}{N}\right) \right) \quad (4.60)$$

$$g_n(k) = \text{REAL} \left[G(n) W^{-n(k-1)} \right] \quad (1 \leq k \leq N) \quad (4.61)$$

以上より、更に n 次スペクトラム $G(n)$ として、次の式が求められる。これは実際のデジタル制御を考慮し、必要な演算ステップ数とメモリ数を最小となる様に変形したものである。この場合、前回のスペクトラム $G_0(n)$ と今回のサンプリング $g(n)$ 、および一周期前のサンプリング $g(0)$ から毎サンプリングタイミングのスペクトラム $G(n)$ が求められる。

$$G(n) = \exp\left(\frac{j2\pi n}{N}\right) \left\{ G_0(n) + \frac{2}{N} (g(0) - g(N)) \right\} \quad (4.62)$$

- $G(n)$: 時刻 t_N における n 次調波スペクトラム
- $G_0(n)$: 時刻 t_{N-1} における n 次調波スペクトラム
- $g(N)$: 時刻 t_N における信号は瞬時値
- $g(0)$: 時刻 t_0 における信号は瞬時値
- N : 基本波一周期のサンプリング数
- n : 高調波次数

更に、逆DFTを行うとき、 $k=1$ に注目して演算すれば以下のようにして $G(n)$ の実

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

部から n 次調波の時刻 t_1 の瞬時値を求めることができる。この値を時刻 $N+1$ における n 次調波の瞬時値として逐次求めていけば良い。

$$g_n(1) = \text{REAL}[G(n)] \quad (4.63)$$

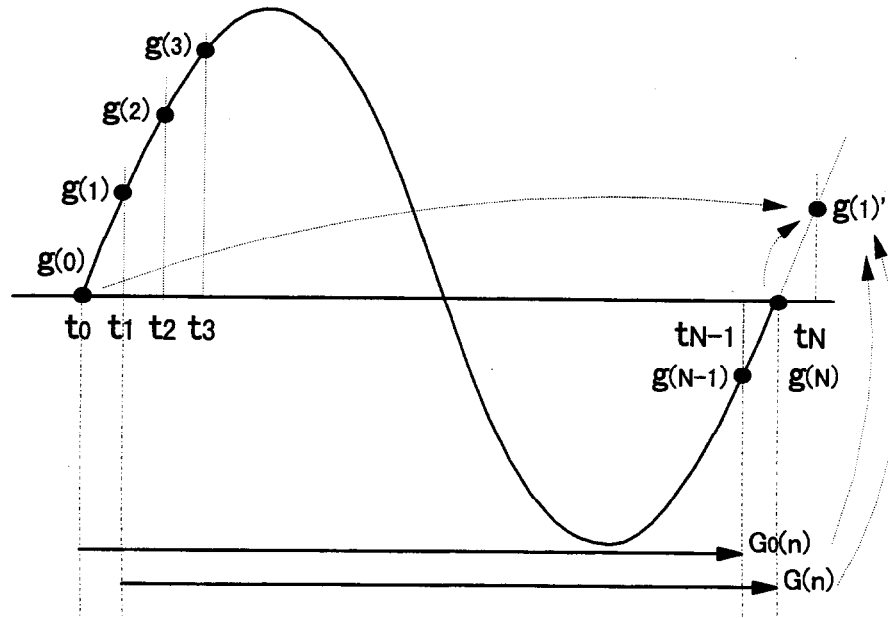


図4. 34 検出信号とスペクトラムの演算

以上の離散値フーリエ変換，逆変換により、例えば2次～5次の高調波を除去する際には図4. 35の構成となる。

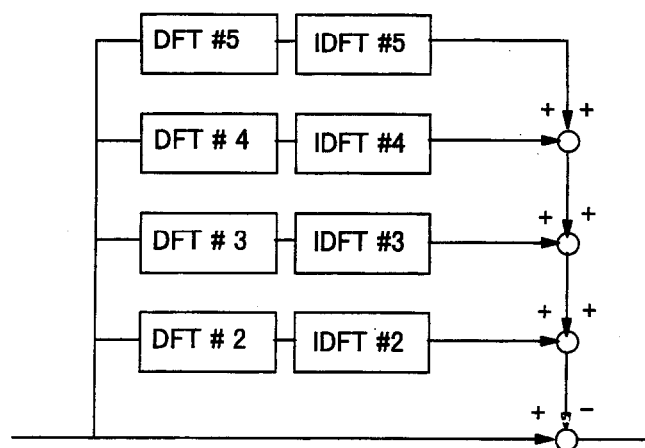


図4. 35 DFTによる2～5次高調波の除去

負荷側に2次，3次，4次，5次の高調波フィルタが設置されている場合に、検出をこの構成とすることにより、これら高調波フィルタとの共振を防止することができる。

(3) 高速電流制御

電流の制御は図4. 3 6に示すような各相での交流瞬時値に対して行う。この場合、3相3線式回路では零相成分は流れないため、2相に対して電流調節器を設ける構成となる。

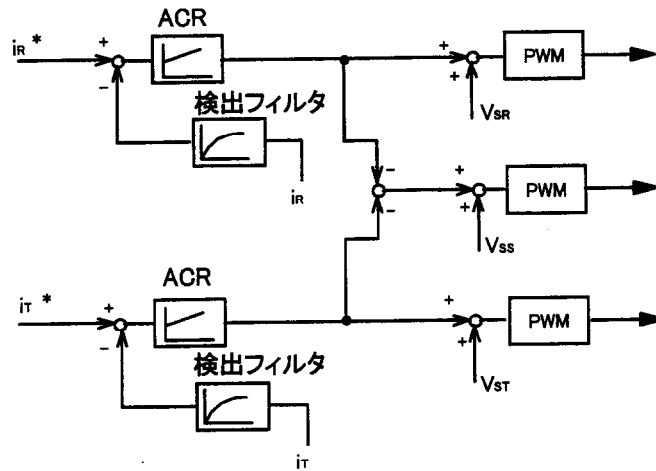


図4. 3 6 電流制御系

この制御系を実際に構成するとき、例えばデジタル制御の場合にはサンプリングによる遅れが制御応答の高速化の障害となる。このため、ここでは図4. 3 6に示した電流フィードバック制御と共に、フィードフォワード制御を併用する。この構成を以下に示す。

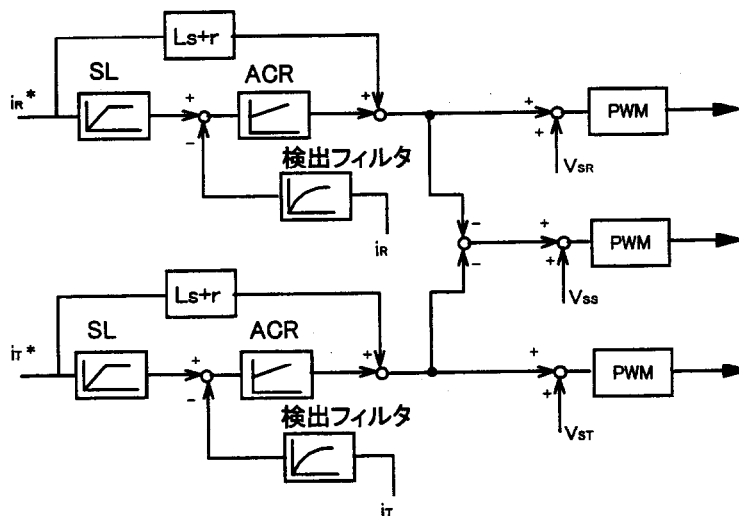


図4. 3 7 フィードフォワード制御を加えた電流制御系

ここで、フィードフォワード部は、以下の系統モデルに基づくものである。

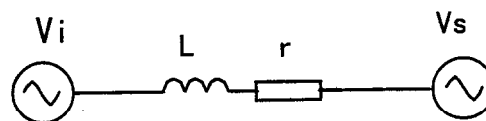


図4. 3 8 フィードフィワード制御に対する系統モデル

フィードバック制御を行う電流調節器（ACR）はPI調節器で構成され、フィードフ

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

ォワード制御の制御エラーを補正すると共に、外乱に対する追従制御を目的としている。しかし、単純にフィードフォワード制御とフィードバック制御を併用した場合、設定の急変時に出力のオーバーシュートが発生してしまう。これは、設定変化に対してフィードフォワード部とACR部の双方が同時に機能するためである。このことを防止するために、本制御では図4.37に示す通り、ACRの指令に、その変化率を制限するスルーレートリミッタ（変化率制限器）を設けている。これは、通常の交流電流指令に対しては制限動作をすることなく、大きなオーバーシュートをきたすステップ状の指令急変のみを制限する。これによって、定常偏差には何ら影響することない。

また、系統電圧の検出部にも検出遅れによる定常的な位相遅れを補正するために、以下の位相補正処理が施されている。これにより、検出フィルタによる遅れを、定常状態で見かけ上、零となるよう補正される。

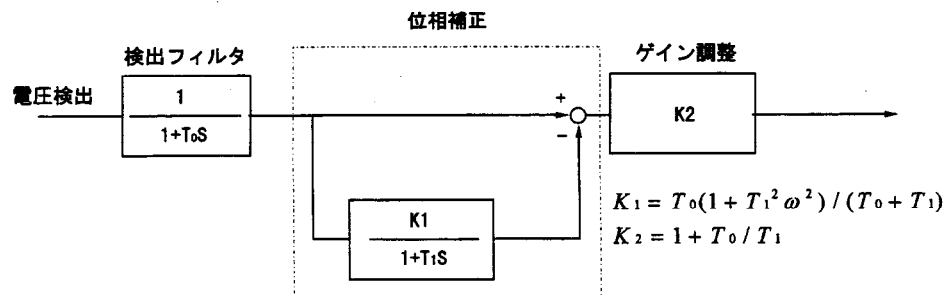


図4.39 系統電圧検出の位相補正

電圧形インバータを動作させた場合、インバータ上下アーム短絡防止を目的に、上下アーム共にオンゲート信号を送らないデッドタイムが設けられる。このデッドタイムはインバータ出力電流零クロス近傍で、出力電圧歪みと、これによる制御遅れの原因となることが知られている。このため、本装置では、出力電流の極性に応じて、目標のPWM制御信号に対して、デッドタイムによる低下電圧分をオフセットとして加算してデッドタイム補償を行う。このとき、電流極性の判別は、検出電流の検出遅れを考慮して、下式の線形一次予測演算により電流零クロス点を求めることを特徴としている。これは、大きな歪みがのっている負荷電流を補償対象とする場合、零クロス点を瞬時に見つけることが困難であるため、アーク炉などが発生するフリッカ補償装置に対して有効な方式と考える。

$$Y_n = X_n + k(X_n - X_{n-1}) \quad (4.64)$$

図4.40はこの動作を模式的に示している。

(4) 制御系の全体構成

以上にその特徴を示した制御系の全体構成を図4.41に示す。ここで電流指令演算部は(2)項で示した構成となっている。本図中で直流電圧調節部は自励式SVCの直流コンデンサ電圧を一定に保つよう機能する。

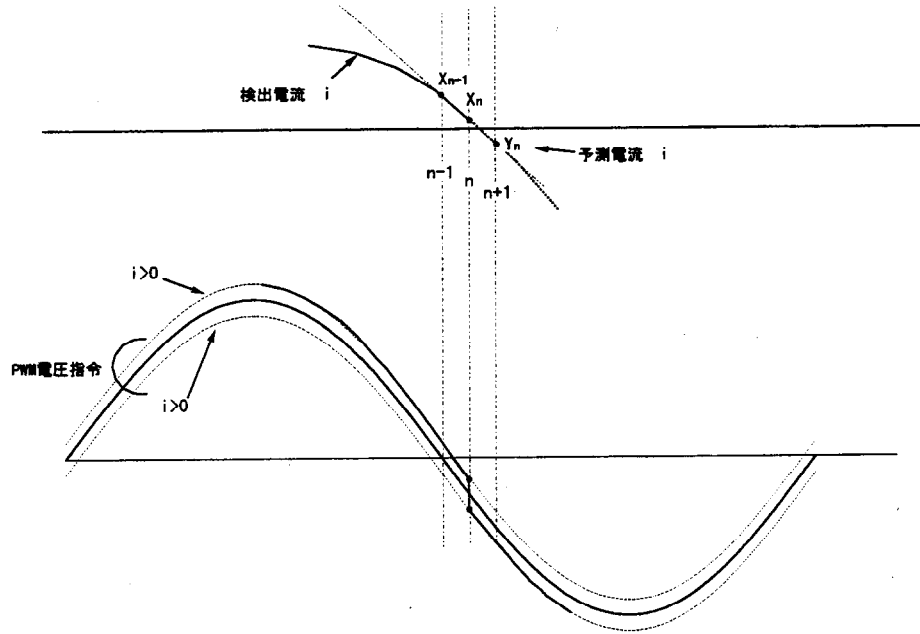


図4. 40 デッドタイム補償

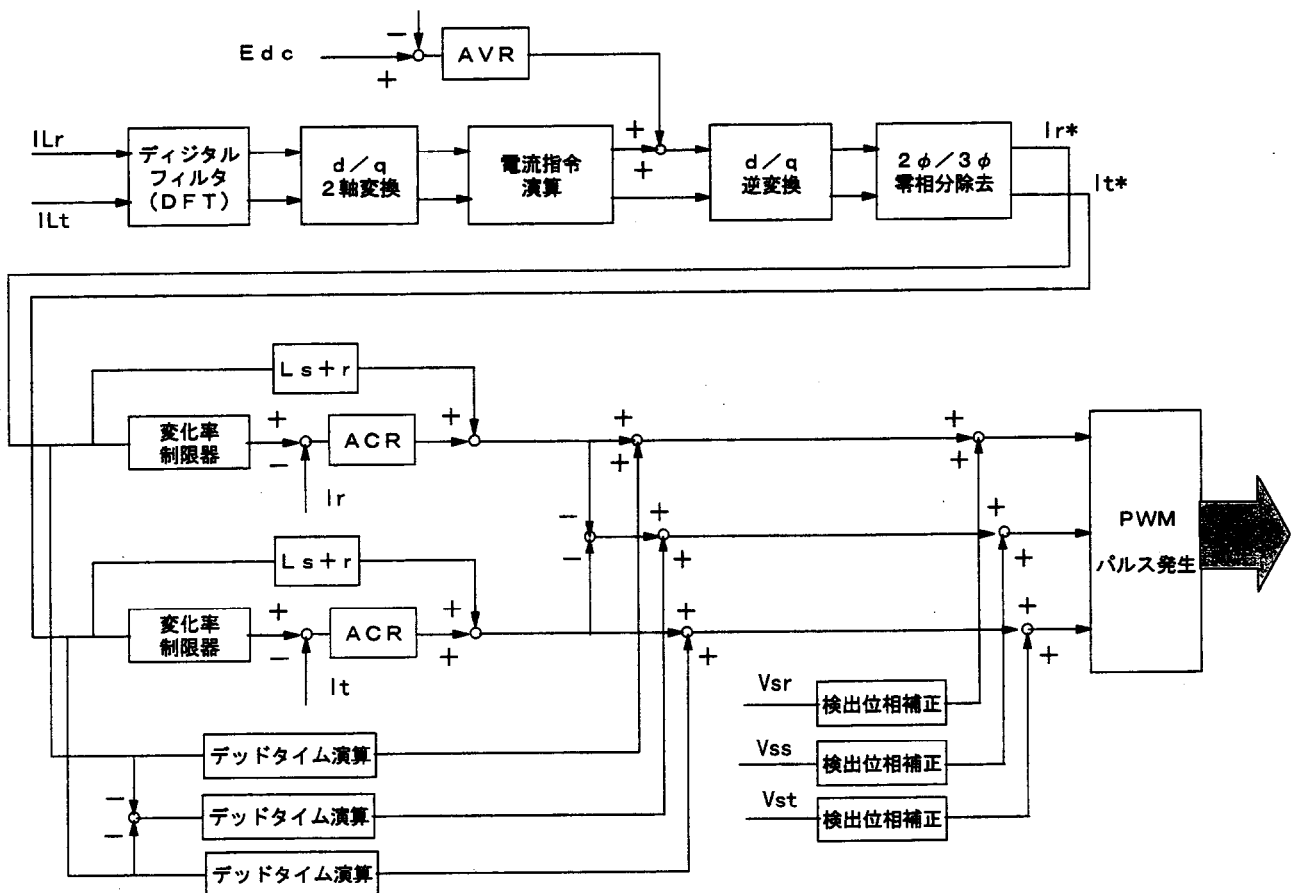


図4. 41 電圧動揺補償制御全体構成

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

4. 4. 3 実験^{(58) (59)}

以上の制御アルゴリズムをデジタル制御で構成し、実験装置を用いてその性能を検証した。

図4. 4 2は実験装置の構成と仕様を示す。

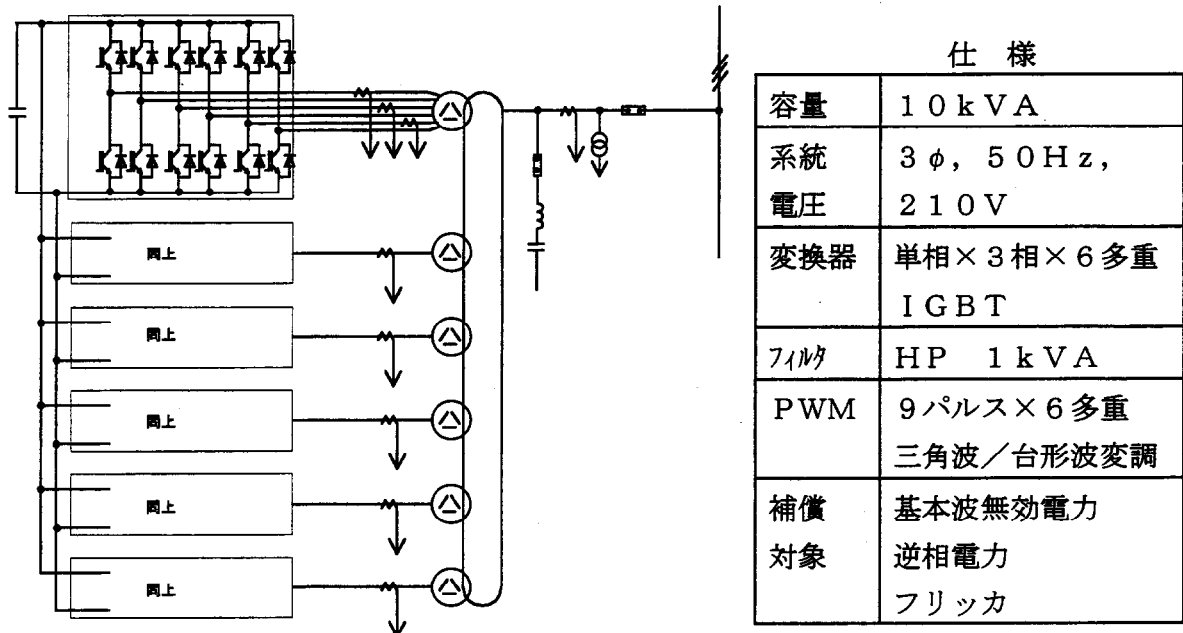


図4. 4 2 実験装置の仕様と構成

(1) 静特性試験結果

図4. 4 3に無効電流出力指令に対する装置の無効電流出力特性を示す。これより進みから遅れの全領域で制御誤差は5%以内となっていることが分かる。

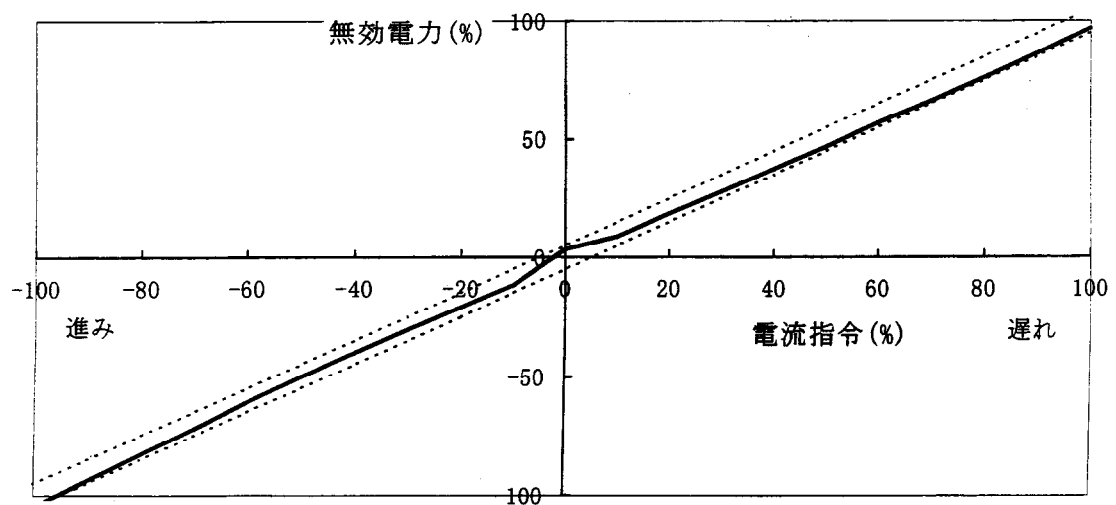
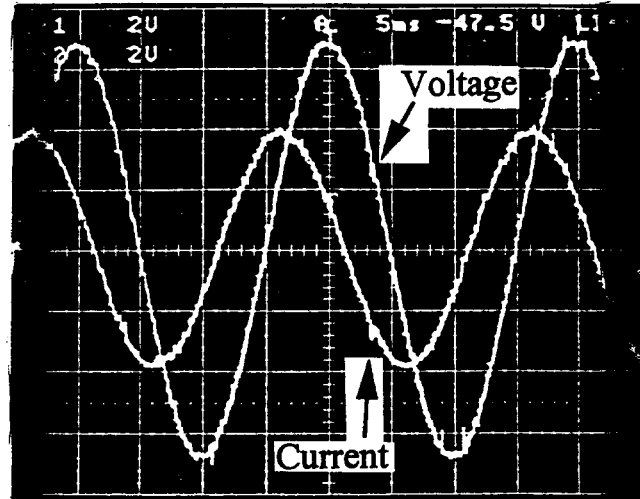


図4. 4 3 無効電力出力設定精度評価試験結果

(2) 出力電流波形

図4.44と図4.45に定常状態における出力電圧・電流波形とこれらの高調波スペクトルを示す。

本装置は単相インバータ3台による三相インバータを6多重し、これを9パルスPWMすることにより、理論高調波は100次以上の次数となる。これにデッドタイム補償や電流のフィードフォワード制御を加えることにより、電圧、電流それぞれの総合歪み率で、それぞれ1.8%，2.2%の低い値となっている。



系統電圧：88V/div，出力電流：19.7A/div，5ms/div

図4.44 出力電圧，電流波形

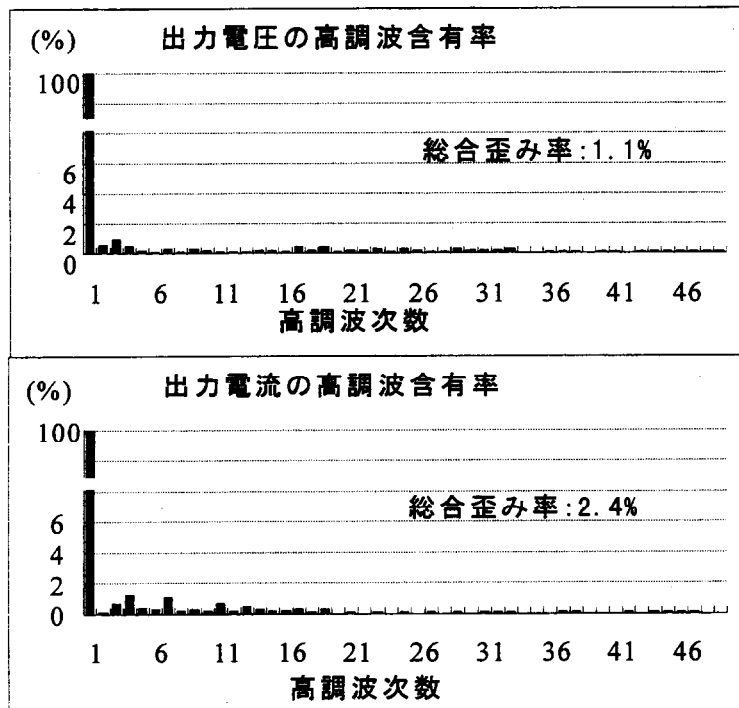
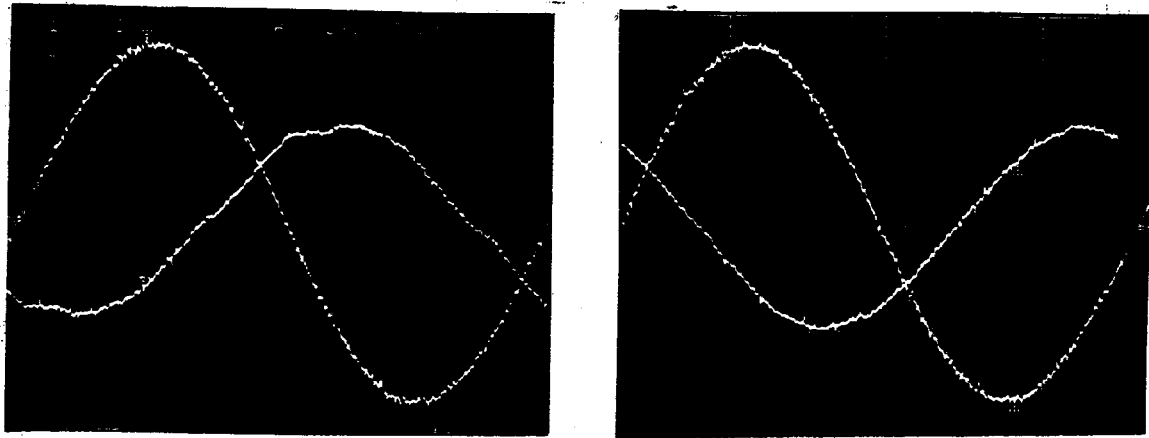


図4.45 ，出力電圧，電流高調波分析結果

第4章 系統電圧の並列形補償器による安定化

また、図4.46には、デッドタイム補償効果を表すために、デッドタイム補償あり、無しの波形を比較して示す。これより、今回のデッドタイム補償が効果的であることが分かる。



(a) 補償無し

(b) 補償あり

図4.46 デッドタイム補償効果 (2ms/div)

(3) DFTフィルタ効果

4.4.2(2)に示したDFTフィルタの効果を実験確認した。ここではDFTフィルタ構成は負荷側に2次、3次、4次、5次高調波フィルタが設置されている場合を想定し、これらの次数の電流を指令から積極的に除去する構成となっている。

図4.47に実験結果を示す。電流指令の元となる負荷電流には、基本波無効電流(50%)に4次高調波(40%)が含まれる場合を想定し、負荷電流、その基本波成分および補償装置出力電流を示している。これより、DFTにより不要調波(この場合4次調波)が理論通り除去されていることが分かる。

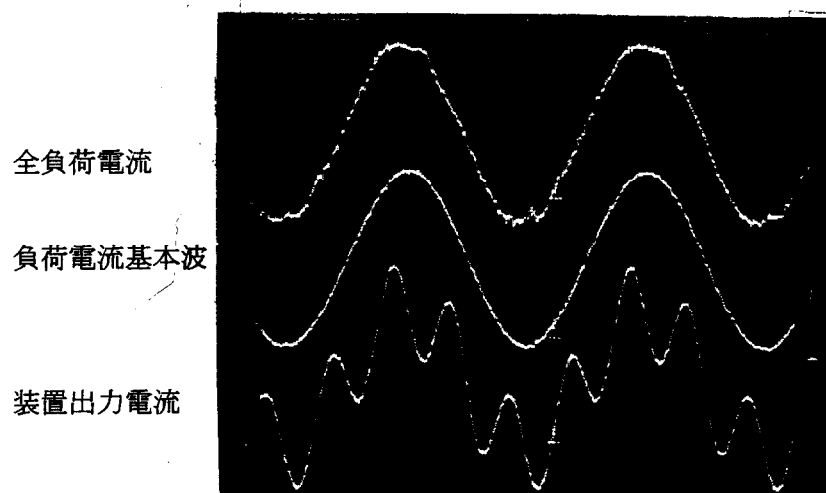
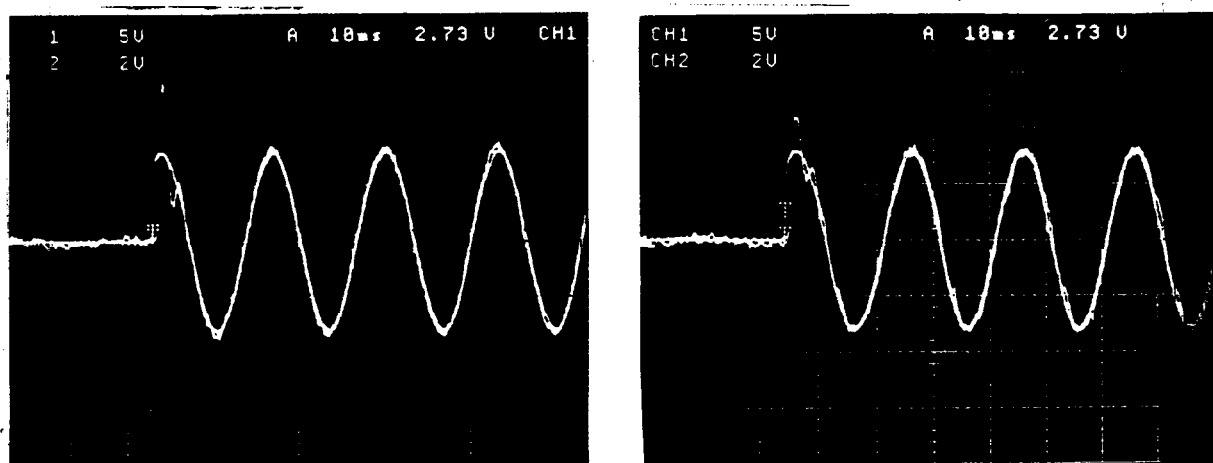


図4.47 DFTフィルタの効果 (5ms/div)

(4) 過渡応答特性

本制御では、定常状態での制御精度と過渡応答特性の双方を改善すべく、4.4.2項で述べた様にフィードフォワード制御とフィードバック制御（ACR）を併用している。そして、この制御方式では、設定急変時のオーバーシュートを避けるために、電流設定に変化率制限リミッタを設けている。この効果を実験により確認した。図4.48に結果を示す。



(a) 変化率制限リミッタ有り

(b) 変化率制限リミッタ無し

図4.48 変化率制限あり、なしにおける設定急変応答波形 (10ms/div)

これより、変化率制限回路の有無に係わらず応答時間（0～90%）は約1ms、整定時間は約4msであるが、オーバーシュート量は変化率制限器無しの場合約80%と過大であるのに対して、変化率制限器ありとするとオーバーシュートは約38%と1/2以下になることが分かる。

また、整定後の定常波形は共に位相差無く追従しており、前述の定常精度結果を裏付ける良好な波形となっていることが分かる。

4.4.4 応用⁽⁶⁰⁾⁽⁶¹⁾⁽⁶²⁾⁽⁶³⁾

系統電圧動揺を抑制するための高速電圧補償方式を述べ、実験によりこれが初期の性能を達成できることを確認した。そこで本装置を実機で動作させた場合の補償性能を検証する。

図4.48はこのSVCを適用する実機系統図を示してゐる。

これに適用する自励式SVCの仕様と構成を図4.50に示す。本システムは短絡容量120MVAのアーケ炉に、85MVAの他励式SVCが既設されたシステムであり、この高圧母線に13MVAの自励式SVCを設置してフリッカの改善をはかるものである。

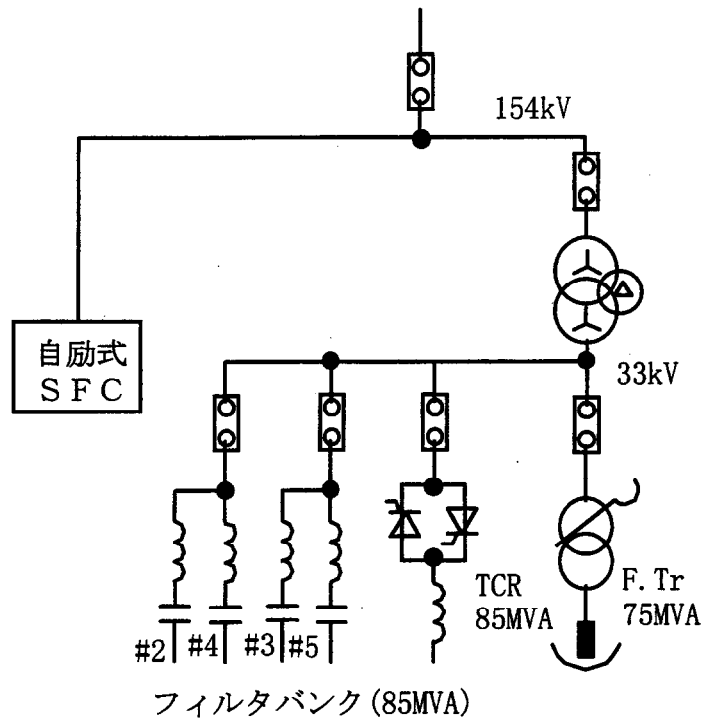
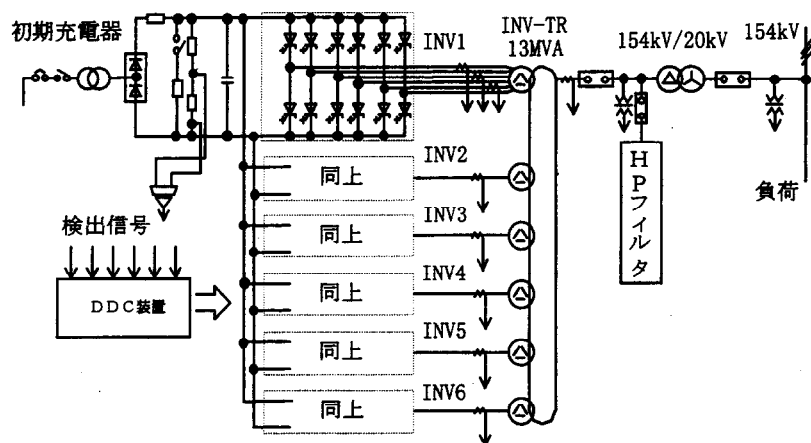


図4.49 アーク炉用電源システム構成図



仕様

容量	13MVA
素子	逆導通GTO (4.5kV, 3kA)
変換器	単相×3相×6多重
変調	9パルスPWM 正弦波／三角波変調
補償	基本波無効電力 逆相電力 フリッカ

図4.50 フリッカ補償用自励式SVCの仕様と構成

図4.51は実際にアーク炉操作中の電流追従試験結果である。検出したアーク炉電流から、無効電流と逆相電流の変動分を抽出演算し、これを出力電流指令として動作させている。自励式SVC出力電流が精度良く指令に追従していることが分かる。

図4.52はフリッカ補償効果試験結果である。アーク炉短絡容量に対して10%程度のSVC装置容量にもかかわらず、約36%のフリッカ改善率となっており、効果的な補償が行われていることが分かる。

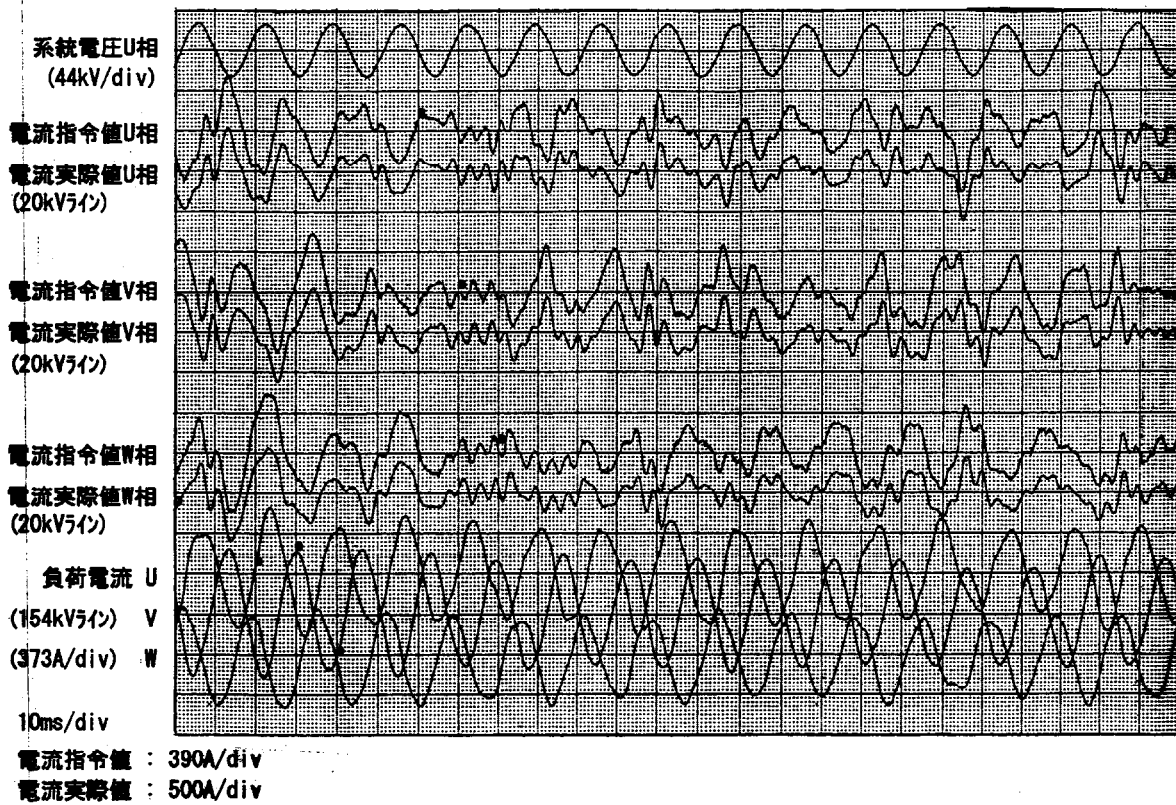


図4. 5 1 電流追従試験結果

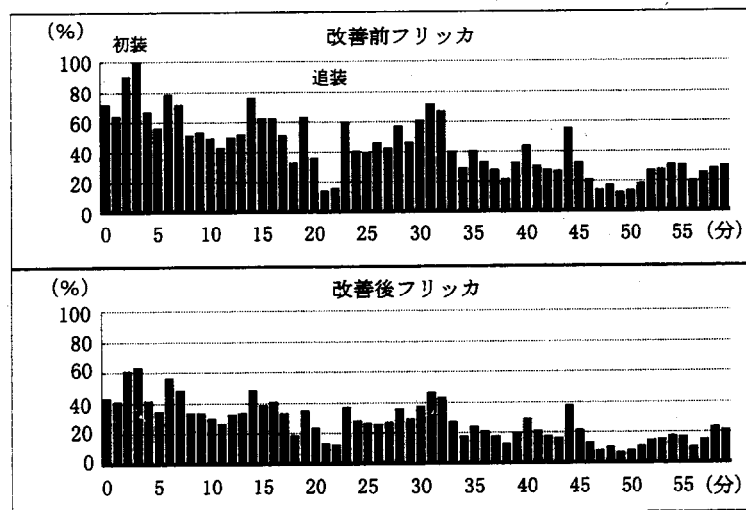


図4. 5 2 フリッカ補償用自励式SVCの仕様と構成

4. 5 まとめ

電力系統の並列形電圧補償器として自励式変換器を用いた静止形無効電力補償装置（自励式SVC）の新しい機能と応用について述べた。半導体を用いた静止形無効電力補償装置には、自励式SVCの他に、サイリスタを用いた他励式SVCがある。本章ではまず、これらの補償特性を理論解析とシミュレーションにより詳細に比較検討し、自励式SVCの優れた点を改めて明確に示した。自励式SVCは単純な電圧補償としては既に実用段階にある。ここでは、新しい機能として、自励式SVCの特性を活かす三相不平衡補償機能と、電圧動揺補償機能の開発について、回路方式、制御方式、実験結果等、詳細に述べた。

以下に本章で得られた成果をまとめて示す。

(1) 自励式SVCには他励式SVCに比べ以下の特長があることを示した。

① 三相不平衡補償

自励式は他励式に比べて、 $1/4$ の容量で補償可能。

(負荷力率 遅れ $\pi/6$ ～進み $\pi/6$)

② 高速応答

PWM及び多重化の適用により、他励式に比べて10倍以上の高速化可能。

(2) 三相不平衡補償制御として、入出力を回転座標変換により正相分と逆相分に分離し、それぞれを2軸非干渉化してフィードバック制御することを特徴とする新しい制御方式を示した。これは、出力電圧制御を行う際、位相と振幅により変調ができ、高速PWMを必要としないため、大容量装置への適用性に優れていることを述べた。

(3) 三相不平衡補償装置の主回路構成例として3パルスPWMインバータの6多重方式を示し、不平衡補償において特徴となる所要直流コンデンサ容量の求め方を示した。

(4) この装置に対して、実験装置を用いて性能検証し、不平衡補償時の補償誤差が総合5%以内（設定に対しては2%以内）と高精度であり、過渡応答は25msであることを示した。更に、実際の電鉄負荷に対する応用を示し、所期の補償が行えることを述べた。

(5) 電圧動揺補償制御では、系統の電圧動揺を引き起こす変動電流成分の高速高精度演算とこの結果を指令として追従させる高速応答が課題であり、有効、無効電流変動分抽出演算回路とフィードフォワードを併用した瞬時ACR（電流フィードバック制御）による制御構成を示した。

(6) さらに、電圧動揺制御の実用化の上で必要なPWM時の予測演算を適用したデッドタイム補償や離散値フーリエ変換による特定次数抽出演算などの周辺制御技術についても述べた。

(7) 実験装置でその性能を検証し、設定制御誤差5%以内と高精度でありながら、応答時間約1msの高速応答性能を実現した。また実際のアーク炉負荷に対する応用を行い所期の性能であることを確認した。

第 5 章

系統電圧の直列形補償器による安定化

第5章 系統電圧の直列形補償器による安定化

5. 1 まえがき

前章では電力系統に並列接続して用いられる系統電圧補償装置として自励式SVCについて、その特徴を活かす三相不平衡補償機能と電圧動揺補償機能の新しい制御方式についてを述べた。本章では、系統に直列接続される直列形補償器について述べる。ここで述べる直列形補償器は、半導体による高速移相器をベースとして構成される。この高速移相器は、従来の機械式タップチェンジャーによる移相変圧器に対して、制御部を半導体化したことを特徴とし、以下の様に高性能な系統制御機能の実現できる。これは、いわゆるFACTS構想の中で、最もその実現が期待される機器の一つと言え、この高速移相器に関する研究報告も多い。^{(66)~(72)}

〔高速移相器の制御機能〕

- ・高速かつ連続的な系統電圧位相制御
- ・系統電圧制御機能
- ・系統インピーダンス制御機能

ただし、これらの研究はいずれも、高速移相器の位相制御機能に注目したものが主であり、これによる系統の潮流を主たる制御対象としている。また、いずれも解析的な研究が主であり、具体的なハード構成に言及した報告は見受けられない。

本論では、この高速移相器と同様の回路構成の直列形補償器を取り上げ、その電圧補償機能に注目した具体的装置として、可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置について、その回路構成、制御、保護方式について述べ、これに基づくシミュレーションと実験による性能検証結果を示す。

5. 2 直列形補償器の基本構成と機能

5. 2. 1 基本構成

図5. 1 (a) に高速移相器をベースとする直列形補償器の基本構成を示す。

本装置は、電力系統に対して直列変圧器を介して、電圧形変換器 (CONV.1) が接続され、この変換器の出力電圧 V_i が系統電圧に直列に重畳 (加算) される構成となっている。この時、系統電流に対し、重畳させる電圧の位相によって、系統から変換器 (CONV.1) に電力が流入したり、または系統に電力が流出する。そこで変換器 (CONV.1) と系統との電力授受に伴うエネルギー処理を行うための電力回生機能付き直流電圧源 (CONV.2) が接続される。

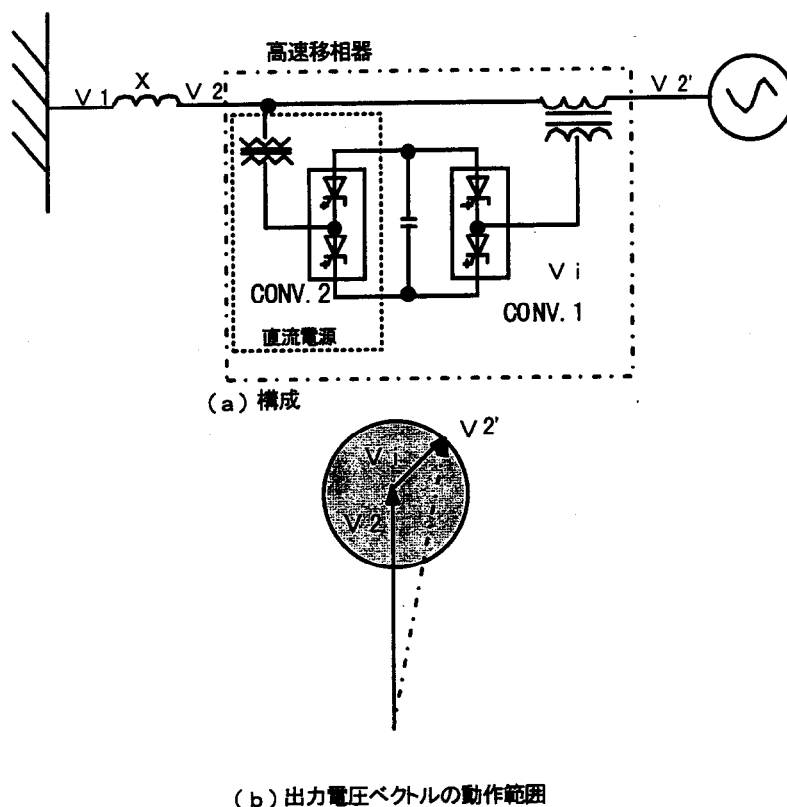


図5.1 直列形補償器の基本構成と出力電圧ベクトル図

5.2.2 機能

直列形補償器は、図5.1(b)の円線内に示すように、出力電圧 V_i の大きさと位相を、装置容量範囲で自由に調整することができる。

そこで、以下に示す種々の機能が実現できる。

① 可変インピーダンス動作（系統電流を基準にした電圧出力）：

系統電流位相を基準にして、以下の様に電圧を出力することにより、可変のインピーダンス装置として機能する。

- ・ 同位相電圧出力 → rI （抵抗動作）
- ・ 逆位相電圧出力 → $-rI$ （電源動作）
- ・ 直交進み電圧出力 → $j\omega LI$ （インダクタンス動作）
- ・ 直交遅れ電圧出力 → $1/j\omega CI$ （コンデンサ動作）

② 電圧補償動作（系統電圧を基準にした電圧出力）：

瞬時電圧低下などの系統電圧変動に対して、3相独立に任意位相、振幅の電圧を出力し、系統電圧に直列加算することで負荷電圧の変動を抑制する。

③ 移相器動作（系統電圧の位相を基準にした電圧出力）：

系統電圧に対して進相／遅相方向の電圧を出力して、端子電圧位相を変化させ、この結果潮流を制御する。この時、位相調整は連続的に行え、系統の安定化、動揺抑制を行うことができる。

5.3 可変リアクタンス装置⁽⁷³⁾⁽⁷⁴⁾

5.3.1 基本構成と動作原理

可変リアクタンス装置は、前項に示した直列形補償器の可変インピーダンス動作の中で、特に系統電流に対して常に $\pm 90^\circ$ 位相で動かすリアクタンス電圧発生器のことをいう。

表5.1に示す通り、送電線路は高圧系になるに従ってリアクタンス成分のインピーダンスが支配的になる。可変リアクタンス装置は、この送電線のリアクタンス成分を補償し、電圧降下、変動を抑制したり、潮流のコントロールを行うことができる。

表5.1 電力系統におけるインピーダンスの例 (架空送配電線)⁽⁷⁵⁾

電圧 (kV)	線種 (mm ²)	電流容量 (GVA)	抵抗 r (pu/km) 1GVAベース	リアクタンス X _L (pu/km) 1GVAベース	対地リアクタンス -X _c (pu/km) 1GVAベース	X _L /r
500	TACSR 810X4	6.95	4.2×10^{-5}	1.3×10^{-3}	8.2×10^2	31
275	TACSR 810X2	1.91	2.8×10^{-4}	4.7×10^{-3}	3.0×10^3	17
154	TACSR 1160	0.52	1.3×10^{-3}	1.8×10^{-2}	1.1×10^4	14
77	ACSR 610	0.13	9.0×10^{-3}	7.2×10^{-2}	4.3×10^4	8.0
6.6	80	0.0046	5.2	9.2	3.0×10^6	1.8

本装置の基本構成は図5.2に示す通りである

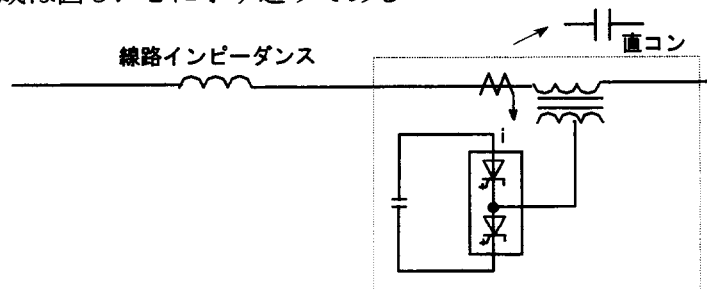


図5.2 可変リアクタンス装置の基本構成

この等価回路は図5.3に示す通りであり、系統に直列で系統電流に常に直交した電圧を発生する電圧源として表される。本装置では、系統電流を検出し、その基本波位相と常に直交する電圧を出力して、見かけ上コンデンサまたはリアクトルとして機能させる。このため、原理的には系統との間でエネルギーの授受は行われず、原理的には前項の図5.1にCONV.2として示した直流電源は不要となる。

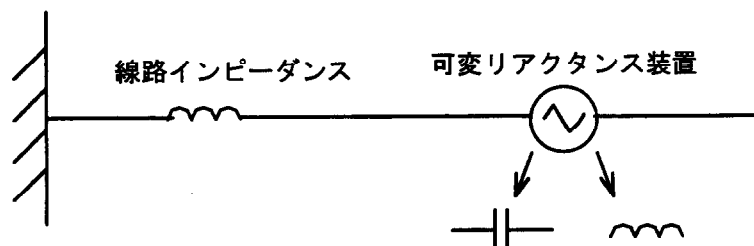


図5.3 可変リアクタンス装置の等価回路

5. 3. 2 主回路構成

可変リアクタンス装置の主回路構成を図5. 4に示す。

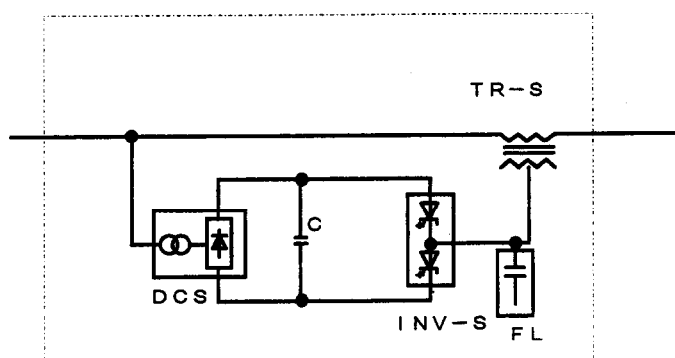


図5. 4 可変リアクタンス装置

各構成機器は下記により設計される。

① 直列変圧器（TR-S）

この変圧器は、系統線路へ直列に挿入され、インバータ（INV-S）の出力電圧を変圧して系統電圧に重畳させる働きをする。従って、一次巻線には、系統電流が流れる。一方、電圧は装置に要求される補償範囲で決まる。例えば、系統インピーダンスが20%であれば、補償電圧範囲も系統電圧の20%程度になる。そこで、この電圧に相当する変圧器容量となる。

また直列変圧器二次側の電圧は、電圧形インバータの出力電圧により決まり、これら一次／二次電圧から変圧比が決まる。変圧器のもれインピーダンスは、電圧源である装置の内部インピーダンスとなるため極力小さいことが望ましい。

② インバータ（INV-S）

インバータは直列部の補償電圧を発生する。これには、任意の電圧が出力できる自励式電圧形インバータが適している。その出力電圧は、上記直列変圧器一次側で所要の補償電圧となる様選定される。

電流は系統電流を直列変圧器の変圧比で除した値となる。

このインバータ容量は、基幹系統で用いる実機では、数MVA以上となるため、現状GT Oクラスのデバイスを用いた、多重構成となるものと予想される。その場合、インバータ出力側に多重インバータトランスが必要となる。

③ その他

前述の通り、可変リアクタンス装置は系統との間で、電力の授受を行わないため、原理的に直流電源は不要である。また、装置の発生損失も、通常の運転においては、直列変圧器を介しインバータ自身で取り込む運転が可能である。しかし、装置の起動時や、系統電流が小さく装置の運転損失を直列変圧器側から確保することの困難な状態に対して、直流電源（DCS）が必要となる。

また、上記インバータの発生する高調波が、電力系統に悪影響を及ぼさないために、必要に応じて直列変圧器とインバータの間に高調波フィルタ（FL）を設けることになる。

5. 3. 3 制御⁽⁷⁶⁾

(1) 制御原理

表5. 1に示したように、送電線路のインピーダンスは高圧系になるに従ってリアクタンス成分が支配的になる。送電線路で用いられる直列コンデンサはこれを相殺し、見かけ上の系統インピーダンスを極小化して、電圧や潮流を制御する。ただし、実際に使用する際には2章に示したように特に過渡状態で系統共振現象（分数調波振動や軸ねじれ共振など）を発生させ、しばしば問題となることがあった。可変リアクタンス装置は、この系統共振を発生させることなく、直列コンデンサと同様の線路インピーダンス制御機能を果たす。

そこで、まず装置に等価的なコンデンサ動作（リアクタンス動作）を行わせるため、電圧、電流をベクトル量として扱える2軸座標系での演算を導入する。

いま、図5. 5に可変リアクタンス装置とこれが等価動作しようとする三相コンデンサ回路を示す。この三相コンデンサ回路に対して下式が成立する。

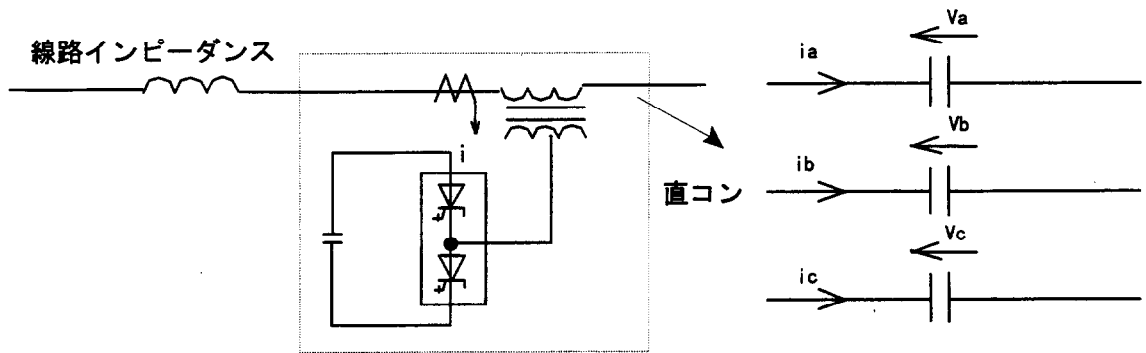


図5. 5 可変リアクタンス装置による等価コンデンサ回路

$$[i] = [Yc][v] \quad (5.1)$$

ここで、

$$[i] = [ia \ ib \ ic]' \quad (5.2)$$

$$[v] = [va \ vb \ vc]' \quad (5.3)$$

$$[Yc] = \begin{bmatrix} CP & 0 & 0 \\ 0 & CP & 0 \\ 0 & 0 & CP \end{bmatrix} \quad (P: \frac{d}{dt}) \quad (5.4)$$

以上に対し、dq座標系において下式が成立する。

$$[i]_{dq} = [Yc]_{dq} [v]_{dq} \quad (5.5)$$

ここで、

$$[C1] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$[C2] = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$[i]_{dq} = [i_d, i_q]^T = [C2] \cdot [C1] \cdot [i] \quad (5.8)$$

$$[v]_{dq} = [v_d, v_q]^T = [C2] \cdot [C1] \cdot [v] \quad (5.9)$$

また、アドミッタンスは次式で表される。

$$\begin{aligned} [Yc]_{dq} &= [C2] \cdot [C1] \cdot [Yc] \cdot [C1]^T \cdot [C2]^T \\ &= \begin{bmatrix} CP & -\omega C \\ \omega C & CP \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.10)$$

以上の関係に対し、本装置では過渡項を無視した定常状態の式から制御則を求める。これにより、過渡状態ではコンデンサとは異なる動作となるが、直列コンデンサの問題点である系統共振の発生が防止できるものと考えられる。

そこで式(5.10)から下式が得られる。

$$[\overline{Yc}]_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega C \\ \omega C & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\therefore \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\omega C \\ -1/\omega C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

また、装置をリアクトル動作させるには、上記のインピーダンス行列の極性を反転させれば良い。

さて、上記はリアクタンス動作として、直列補償器に線路電流に対し直交方向の電圧を出力させるための演算である。この場合には、装置と電力系統間で電力の授受は無いが、実際には運転に伴う装置損失を補うために、装置を等価抵抗成分として動作させる必要がある。この要求に対しては、下式に従って同相成分の電圧を出力する回路を付加すれば良い。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

以上により、制御構成は図5.6の通りとなる。

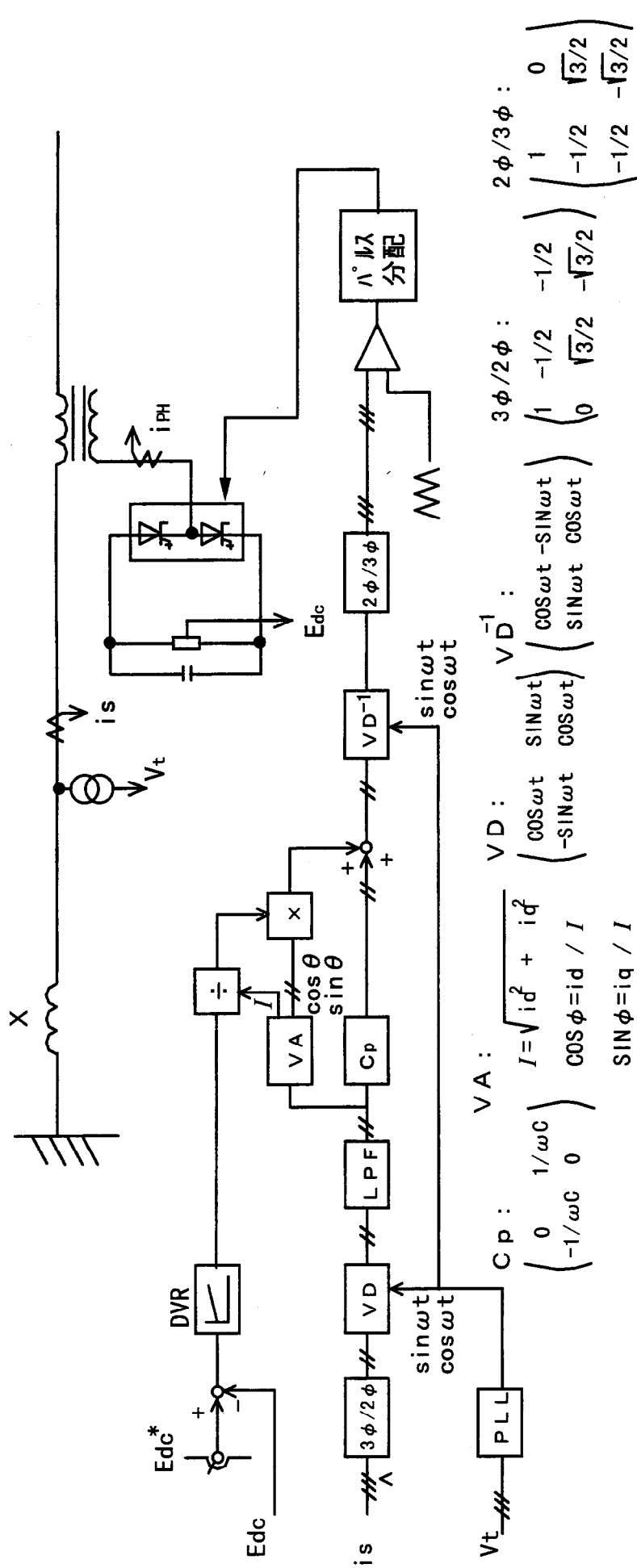


図 5. 6 可変リアクタンス装置の制御構成

(2) 不平衡補償

負荷電流が不平衡の場合の補償は、別に線路電流の逆相分を検出し、前項と同様に直交方向の電圧を出力させる演算を行う。これを前記の正相変換を行う演算系に追加すればよい。

逆相電流／電圧に対する関係式は以下になる。

$$\begin{bmatrix} v_{dN} \\ v_{qN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/\omega C \\ 1/\omega C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dN} \\ i_{qN} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

ここで

$$[i]_{dqN} = [i_{dN} \ i_{qN}]^T = [C3] \cdot [C1] \cdot [i] \quad (5.15)$$

$$[v]_{dqN} = [v_{dN} \ v_{qN}]^T = [C3] \cdot [C1] \cdot [v] \quad (5.16)$$

$$[C1] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$[C3] = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

ここで、不平衡補償を行う場合に、前項と同様装置自身で運転損失を補う制御を行うには、電力を正相分と逆相分に分離して扱う必要がある。

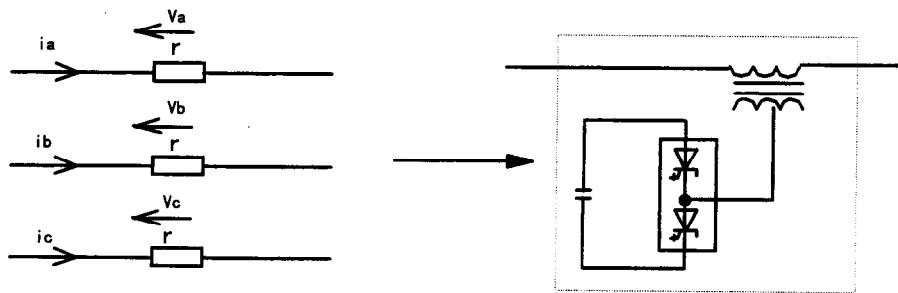


図5.7 可変リアクタンス装置の抵抗動作モデル

いま装置自身で運転損失を補うためには、等価的に抵抗動作を行うことになる。このモデルを図5.7に示す。系統各相に不平衡な電流 i_a , i_b , i_c が流れるとき、装置を等価抵抗 r となるように動作させる。

ここで、系統電流が正相電流 i_p と逆相電流 i_n に分解され、これらが抵抗 r に流れることによる消費電力をそれぞれ P_p , P_n とまた全電流による消費電力を P とすると下式が成り立つ。

$$P = r(i_p^2 + i_n^2) = P_p + P_n \quad (5.19)$$

$$P_p = \frac{i_p^2}{i_p^2 + i_n^2} P = \frac{P}{i_p^2 + i_n^2} i_p^2 \quad (5.20)$$

$$P_n = \frac{i_n^2}{i_p^2 + i_n^2} P = \frac{P}{i_p^2 + i_n^2} i_n^2 \quad (5.21)$$

$$r = \frac{P}{i_p^2 + i_n^2} \quad (5.22)$$

となる。この様にして求めた電力指令 P_p , P_n より、インバータの出力電圧指令（正相分 V_p ,

逆相分 V_n を求めると下式になる。

$$V_p = \frac{P_p}{i_p} = \frac{i_p}{i_p^2 + i_n^2} P \quad (5.23)$$

$$V_n = \frac{P_n}{i_n} = \frac{i_n}{i_p^2 + i_n^2} P \quad (5.24)$$

となる。

以上より、不平衡補償を行うための制御構成は図5.8の通りとなる。

これは、図5.6に対して点線部が追加された構成となっている。

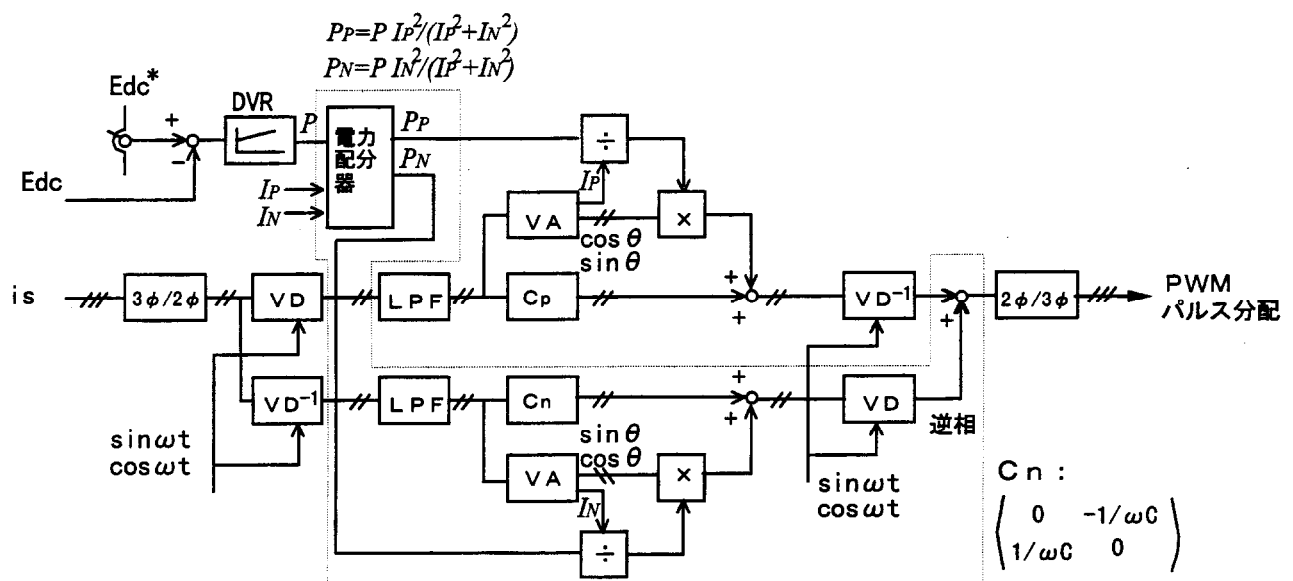


図5.8 不平衡補償を考慮した可変リアクタンス制御

5.3.4 保護

(1) 限流動作

系統短絡事故等が発生したとき、可変リアクタンス装置が系統インピーダンスを補償するコンデンサ動作を行うと、系統短絡容量を増加させることになる。この場合装置をリアクトル動作させ、限流動作を行うことが要求される。本装置ではこの動作を制御により行うことができる。

補償装置を等価リアクトルとして動作させるには、2軸量でのコンデンサの行列 $[C_p]$ 、 $[C_n]$ の符号を単に反転させればよい。以下に2軸量で表したコンデンサ及びリアクトルの正相／逆相行列を示す。

$$[C_p] = \begin{bmatrix} 0 & 1/\omega C \\ -1/\omega C & 0 \end{bmatrix} \rightarrow [L_p] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$[C_n] = \begin{bmatrix} 0 & -1/\omega C \\ 1/\omega C & 0 \end{bmatrix} \rightarrow [L_n] = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

そこでこのための制御系を図5.9に示す。ここでは簡単のため正相系について表しているが、インピーダンス行列 $[C_p]$ （逆相系では $[C_n]$ ）の出力段に、過電流により極性を

反転させる極性反転回路を設ければ良い。

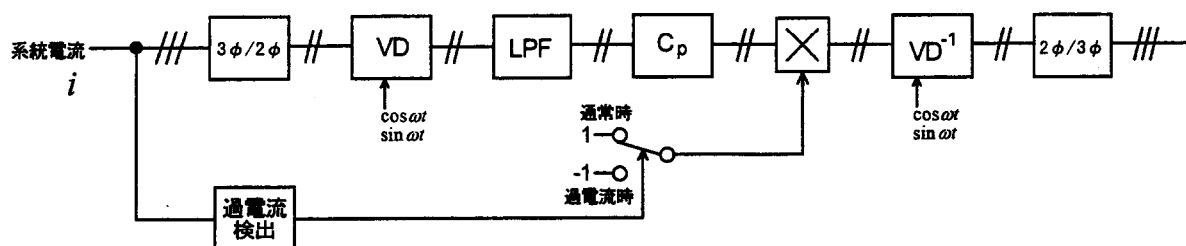


図5.9 可変リアクタンス装置による限流制御回路

(2) 短絡保護動作

以上のように、本装置は系統の短絡電流を制御で限流させることが可能であるが、短絡電流が過大であり、限流動作では保護が不可能な場合には、装置自身の過電流保護動作を行う必要がある。直列形補償器の場合、過電流等により装置を遮断停止しすると、装置の両端（直列トランス両端）に全系統電圧が印加され、過電圧となる。従って、原理的に本装置の保護は、装置出力端子を短絡することで行う。これは、系統に並列接続される SVC などの並列形補償器の遮断保護と相対の関係にあると言える。

この短絡保護保護方式には、図5.10の通り、

- ・ 系統側の短絡（一次側短絡）
- ・ 直列変圧器の2次側短絡

が考えられる。

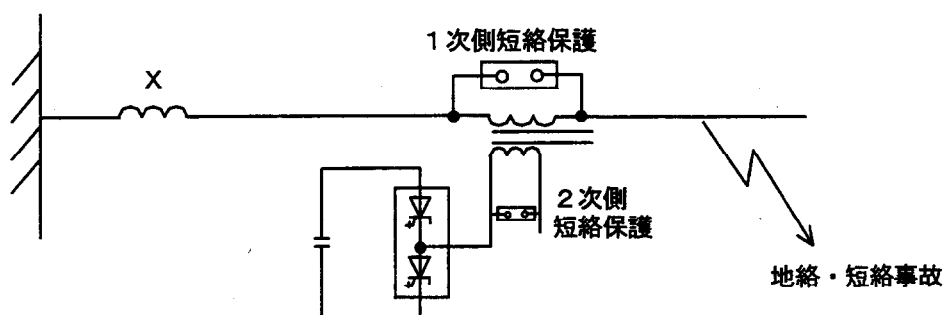


図5.10 系統短絡事故時における直列形補償器の保護

これら一次側、二次側の短絡は原理的には同様である。更に、図5.11に示すような3巻線トランスを用い、その3次側を短絡する方式も完が割られる。この方式は、一次、二次短絡に対して以下の特徴がある。

3巻線トランスを用いた短絡保護の特徴：

- ① 1次側は高電圧で、高耐圧の保護短絡器が必要となる。
- ② 2次側の短絡は、電圧形インバータの出力側を直接短絡することになり、インバー

タの保護が困難となる。

- ③ 3次巻線を持つトランスの3次側は、任意の電圧とすることができるため、保護装置電圧階級を自由に選べる。
- ④ 巻線間のインピーダンスを調整することで、電圧形インバータを直接短絡することが回避できる。

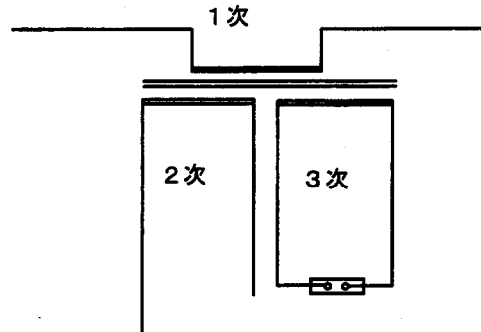


図5. 1 1 3巻線トランスの三次巻線短絡による保護

図5. 1 2は、系統短絡事故に対し、3巻線トランスによる保護を採用したときの基本構成である。装置の短絡回路は、機械スイッチを併用した半導体スイッチを用いることにより、高速短絡保護動作を実現させるものである。

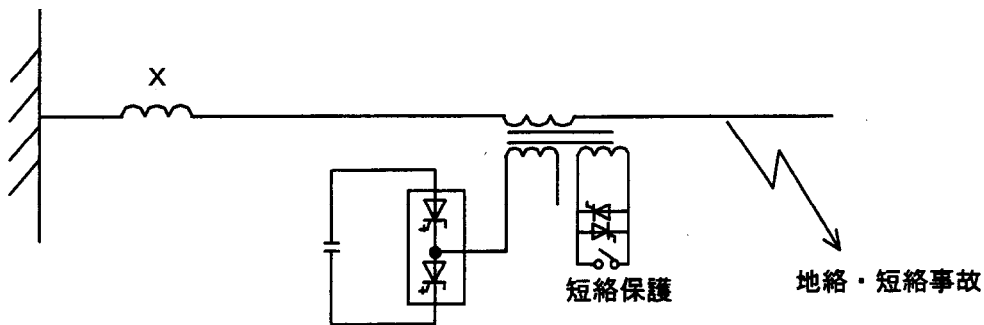


図5. 1 2 3巻線トランスを用いた直列形補償器の保護

さて実際に3巻線トランスを用いて短絡保護を行う場合、そのもれインピーダンスを以下のように設計する。

$$X_{12} = X_{23} + X_{13}$$

(5. 27)

x_{12} : 一次／二次間もれインピーダンス

x_{23} : 二次／三次間もれインピーダンス

x_{13} : 一次／三次間もれインピーダンス

このとき、トランスの等価回路を図5. 1 3の様に考える。

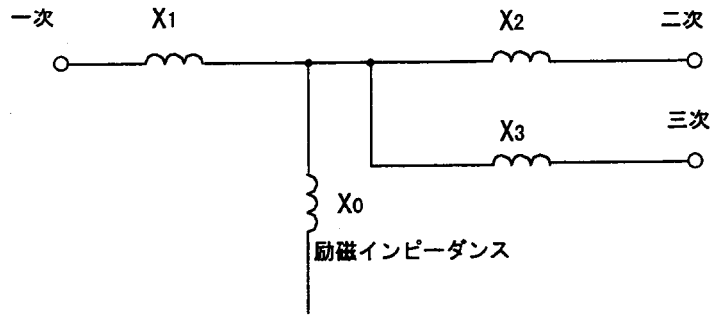


図5. 13 3巻線トランスの等価回路

そこで、

$$X_{12} = X_1 + X_2 \quad (5. 28)$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 \quad (5. 29)$$

$$X_{13} = X_1 + X_3 \quad (5. 30)$$

より、

$$X_3 = 0 \quad (5. 31)$$

となって、三次側を短絡することで、変換装置が接続される二次側の過電圧を防止できる。

(3) 保護シーケンス

上記の限流動作と短絡動作を組合せると図5. 14に示す動作となる。

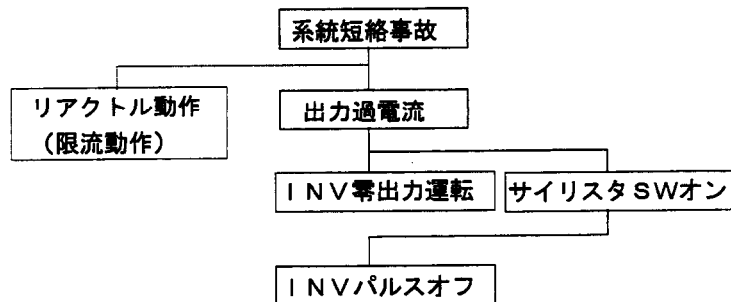


図5. 14 系統短絡事故時の保護シーケンスフローチャート

5. 3. 5 シミュレーション

以上に示した可変リアクタンス装置による系統電圧の安定化特性について、シミュレーションにより性能評価を行った。

図5. 15にシミュレーションモデルを示す。系統インピーダンス0.2puの電力系統に三相又は単相のL負荷が接続された場合を解析した。可変リアクタンス装置のインバータは三相フルブリッジインバータとして15パルス(750Hz)PWMで動作させるものとした。その出力には共振周波数300Hzの高調波フィルタを設けた。制御は前述の通りとし、不平衡補償制御が行えるようにした。ただし、この場合は直流回路には整流電源を設け、制御系では直流電圧の制御は行わない条件で解析した。

なお、シミュレーションはEMTPと同種の系統過渡現象解析プログラムのEMTDCを用いて行った。⁽⁷⁷⁾

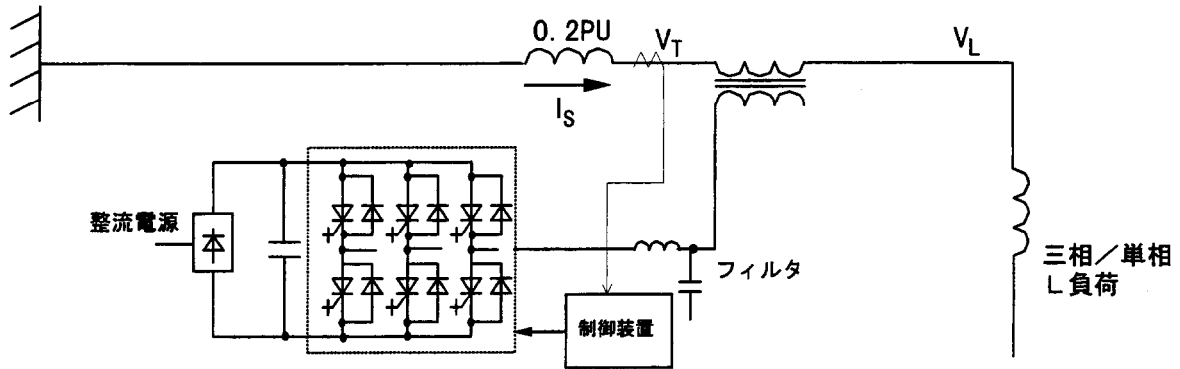


図5. 15 シミュレーションモデル

(1) 平衡負荷時の過渡応答

三相リアクトル (1pu) の投入に対するシミュレーションを行った。比較のために可変リアクタンス装置の代わりに直列コンデンサを用いた場合の特性も求めた。但しこの場合、補償率100%とすると完全な共振系になってしまうため補償率75%として解析した。図5. 16に解析結果を示す。

直列コンデンサの場合、負荷投入後に低周波共振が発生し、系統電流と共に負荷電圧の動揺が見られる。これに対して可変リアクタンス装置ではこの振動現象が全く見られず、約1～2サイクルで負荷電圧がほぼ100%補償されていることが分かる。⁽⁷⁶⁾

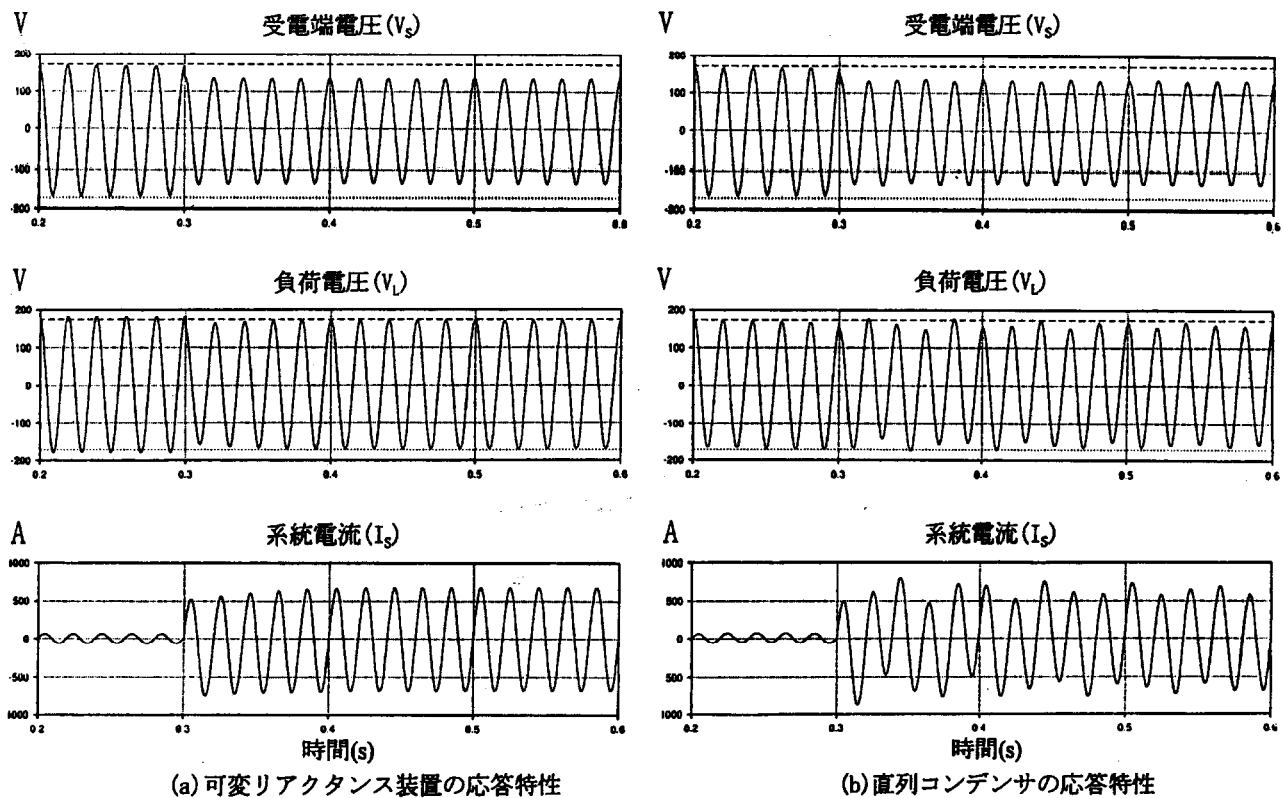


図5. 16 平衡負荷投入時の補償過渡特性

(2) 単相負荷時の補償⁽⁷⁸⁾

負荷として1 p uの単相L-R負荷（力率0.7）を接続したときの不平衡補償特性を求めた。比較のために、不平衡補償を行わなかった場合の解析した。結果を図5.17に示す。本図中、不平衡率は、瞬時対称座標変換による逆相電圧／正相電圧を連続的に計算したものである。補償無しの場合には約12%の電圧不平衡率（逆相電圧／正相電圧）となっているが、補償することにより不平衡率2%まで改善できている。

なお、補償後の不平衡率が0%とならないのは、高調波フィルタや直列変圧器のもれインピーダンスによる装置内部インピーダンスが制御誤差となって現れたものである。

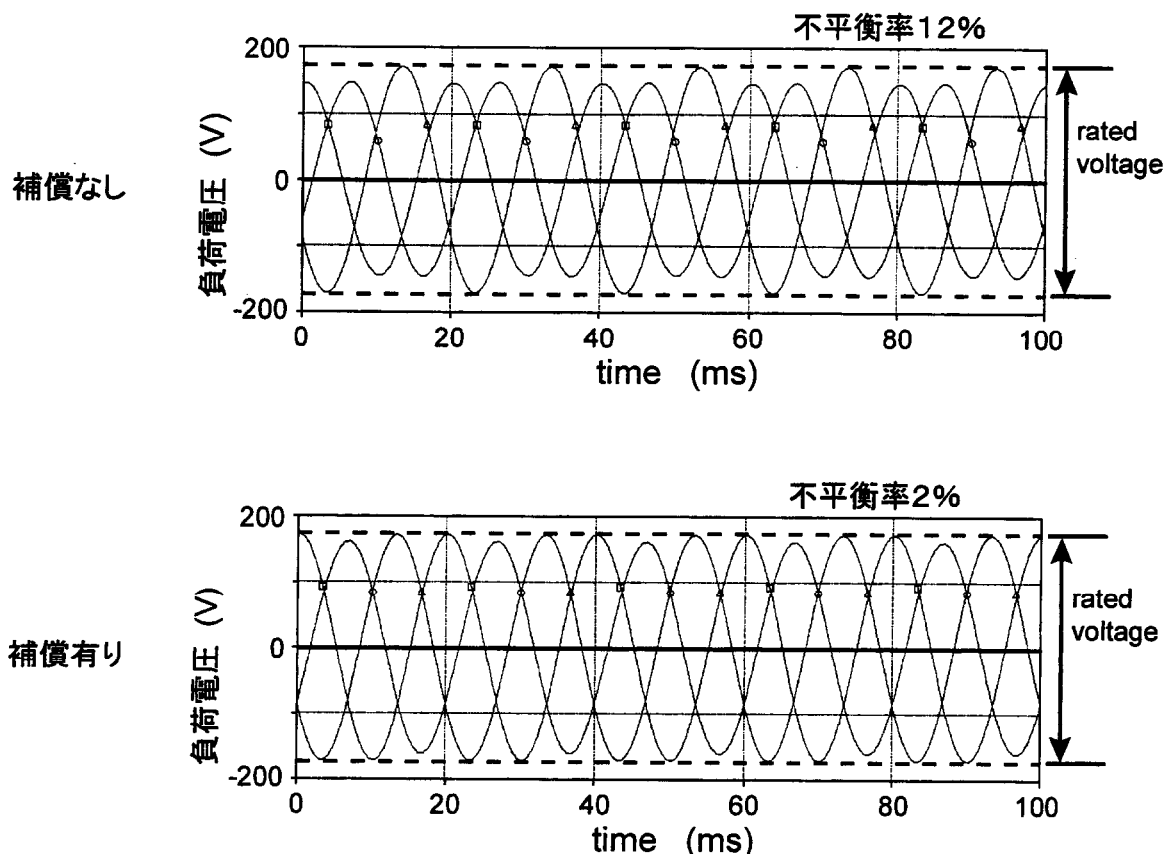


図5.17 不平衡負荷に対する補償特性

5.3.6 実験

以上の装置性能を検証するために、実験装置を用いた評価試験を行った。

図5.18に実験装置の構成と仕様を示す。本装置では、主変換器として、単相3台による三相IGBTインバータを2多重構成で用いた。電圧制御は正弦波／三角波変調によるPWMとし、キャリア周波数を1350Hzとした。

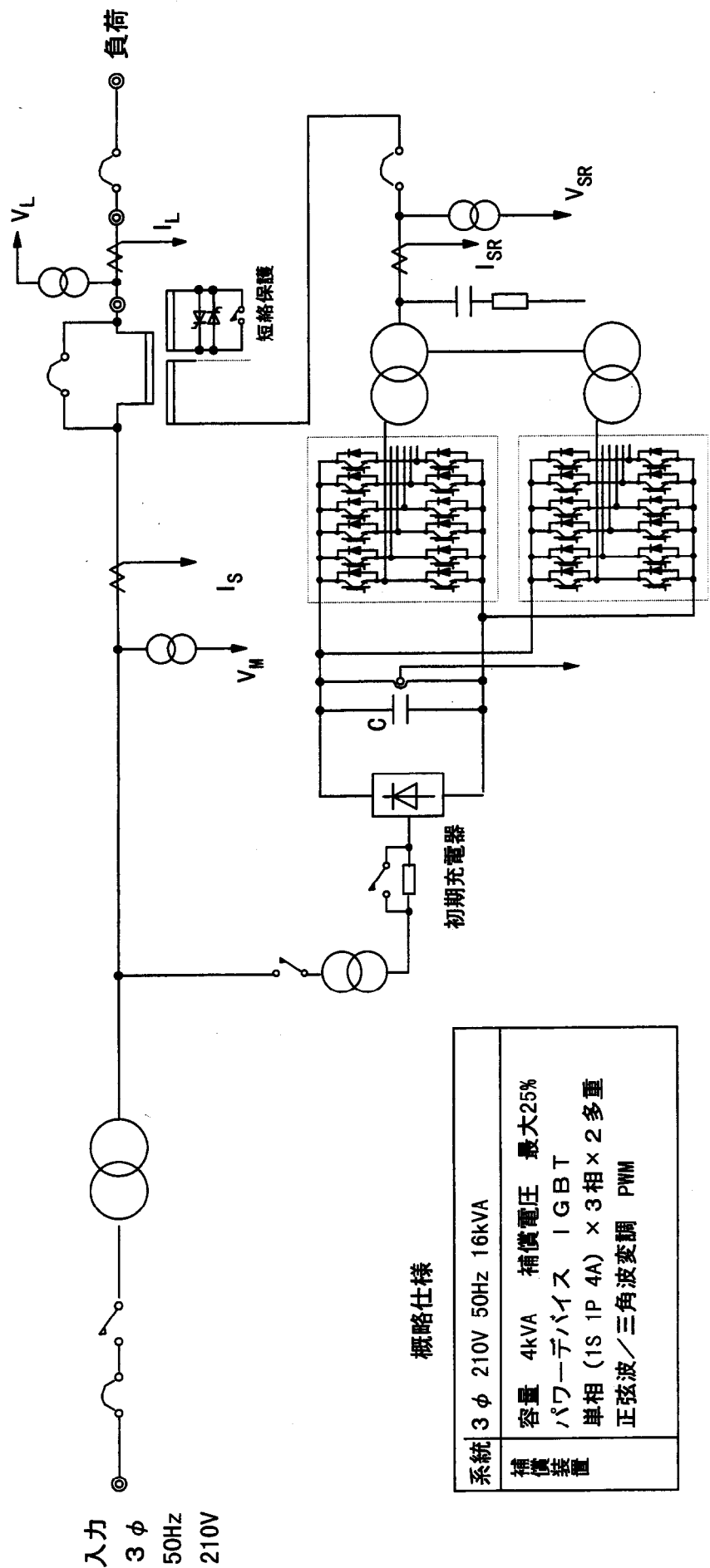


図 5. 1 8 実験装置

第5章 系統電圧の直列形補償器による安定化

(1) 電圧補償静特性

図5. 19に平衡負荷リアクトル負荷の大きさを変化させたときの、電圧補償静特性試験結果を示す。これより、負荷電圧 V_L は、無補償時に定格負荷点で約42V低下しているのに対して、補償後は6V程度の低下に改善されることが分かる。

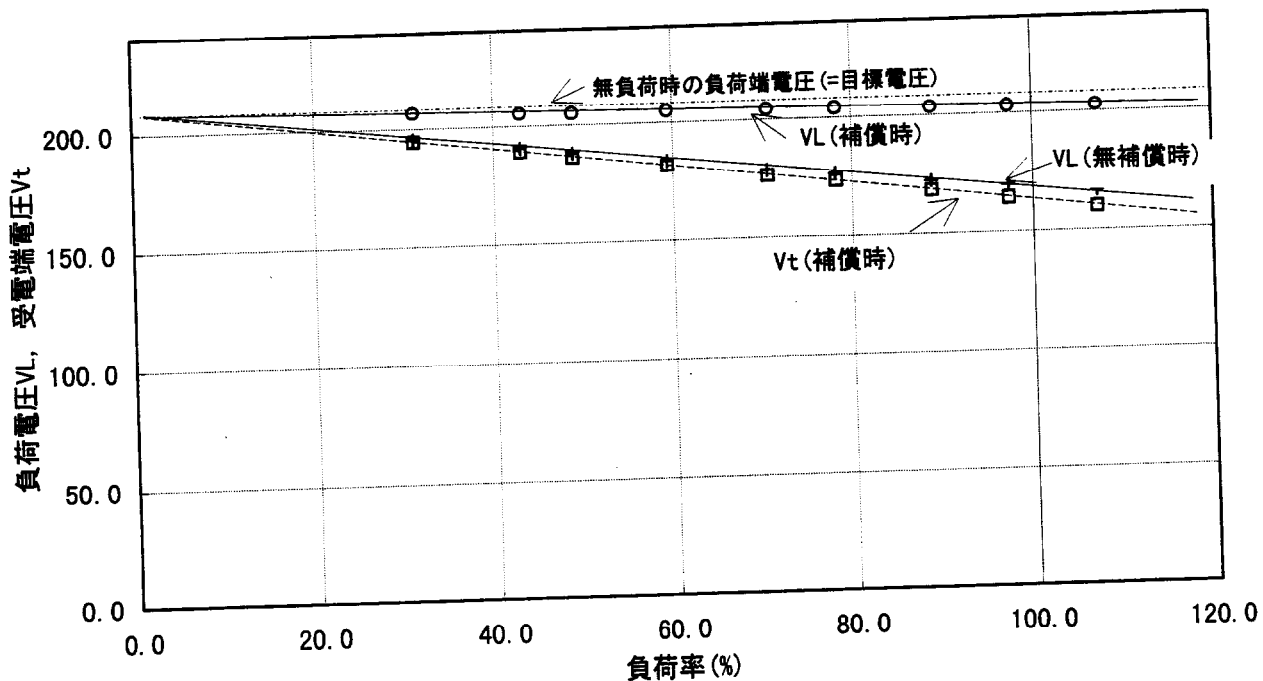


図5. 19 負荷率に対する電圧補償特性 (平衡負荷)

また、図5. 20は100%負荷時に、装置の補償率を変化させたときの負荷電圧 V_L と受電端電圧 V_t を表している。これからも装置が所期の電圧補償動作を行えることが分かる。

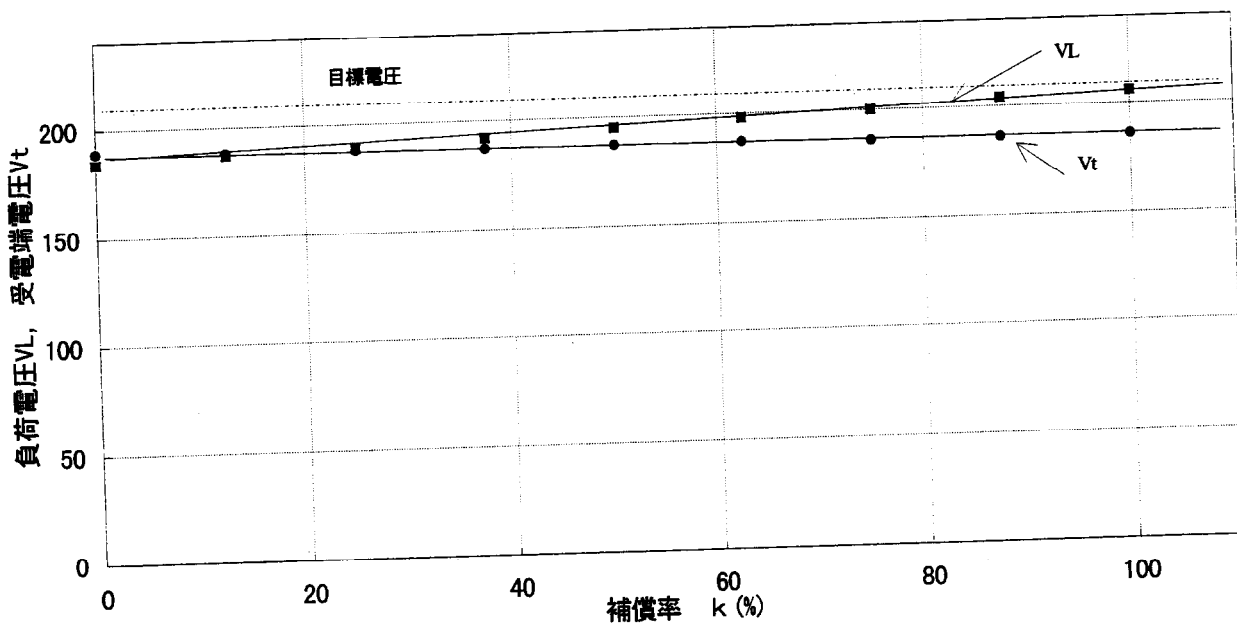


図5. 20 補償率を変化させたときの電圧補償特性 (平衡負荷)

これらの補償結果で、装置の補償特性が100%でないのは、系統インピーダンスの誤差および、装置の内部インピーダンスによるものである。

図5. 21は、RS相間に単相L負荷を接続したときの、負荷率に対する補償時、無補償時の負荷端子電圧（RS相間）の測定結果である。これより、単相負荷の接続されるRS相の負荷端子電圧が、無補償時に約40V低下（負荷率44%時）するのに対し、補償することで約5Vの低下に改善できている。

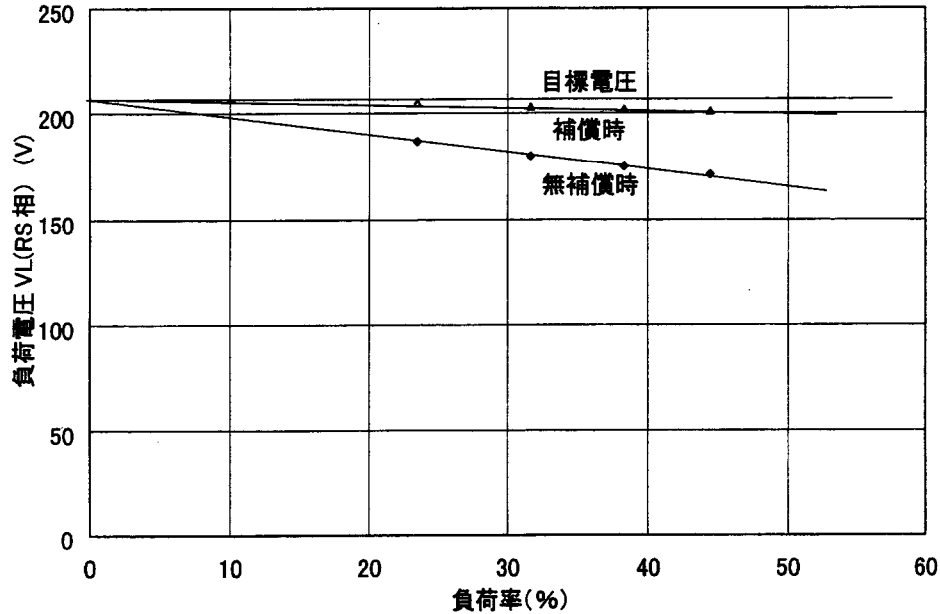


図5. 21 負荷率に対する不平衡電圧補償特性（端子電圧）

図5. 22はこのときの不平衡率を表している。また、図5. 23は補償率に対する不平衡率である。補償装置無しの場合に負荷端子電圧の不平衡率が9.8%（負荷率44%時）であったものが、不平衡率1.7%に是正されていることが分かる。ただし、逆に受電端電圧 V_M は、無補償時（ $V_M = V_L$ ）より僅かながら不平衡が増大している。

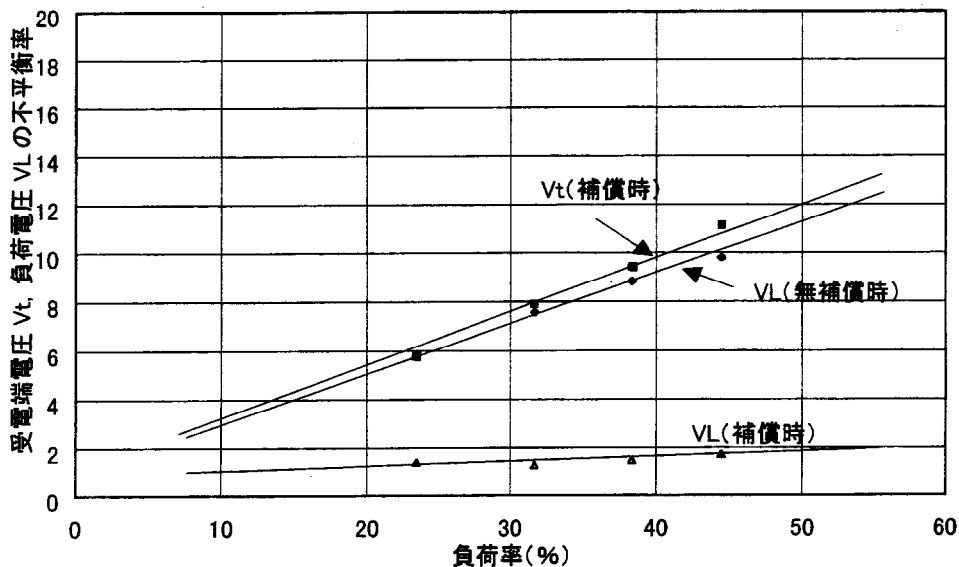


図5. 22 負荷率に対する不平衡電圧補償特性（不平衡率）

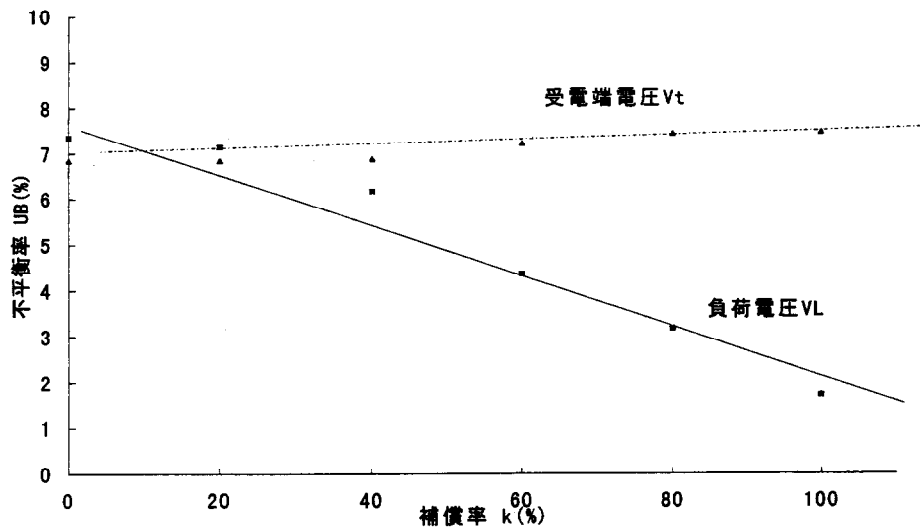


図5. 23 補償率に対する不平衡電圧補償特性 (不平衡率)

(2) 過渡特性⁽⁷⁹⁾

図5. 24は、三相のL負荷を投入したときの補償応答特性を示すものである。これより、おおむね1サイクルで追従し、この時、異常な共振現象の発生していないことが分かる。

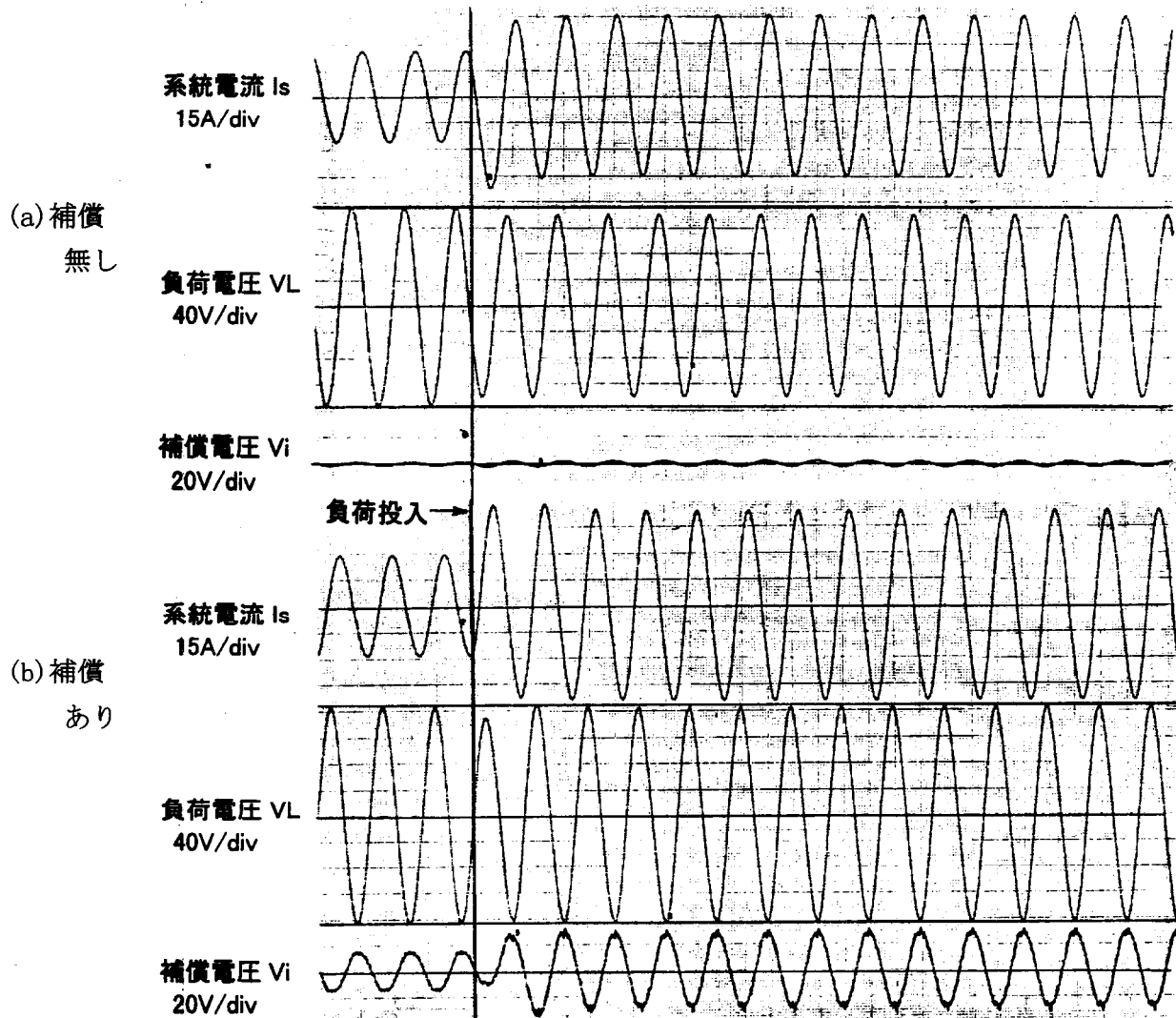


図5. 24 過渡応答試験結果 (三相RL負荷)

(3) 高調波

図5. 25に三相平衡リアクトル負荷に対する補償動作を行った時の各部波形を示す。

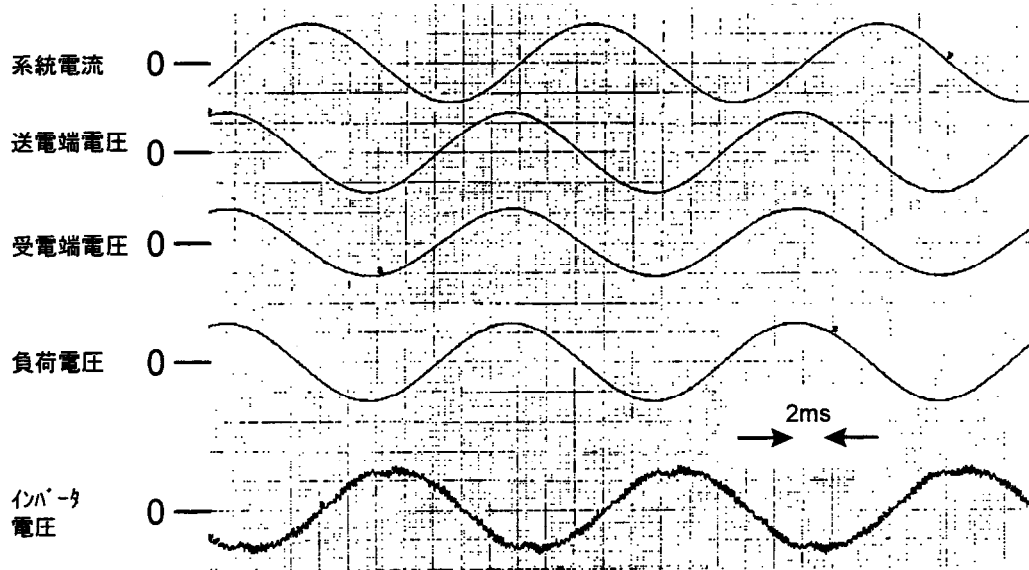


図5. 25 補償動作波形 (三相RL負荷)

図5. 26は補償する負荷電圧の高調波測定結果を、補償前と比較して示した高調波スペクトラムである。

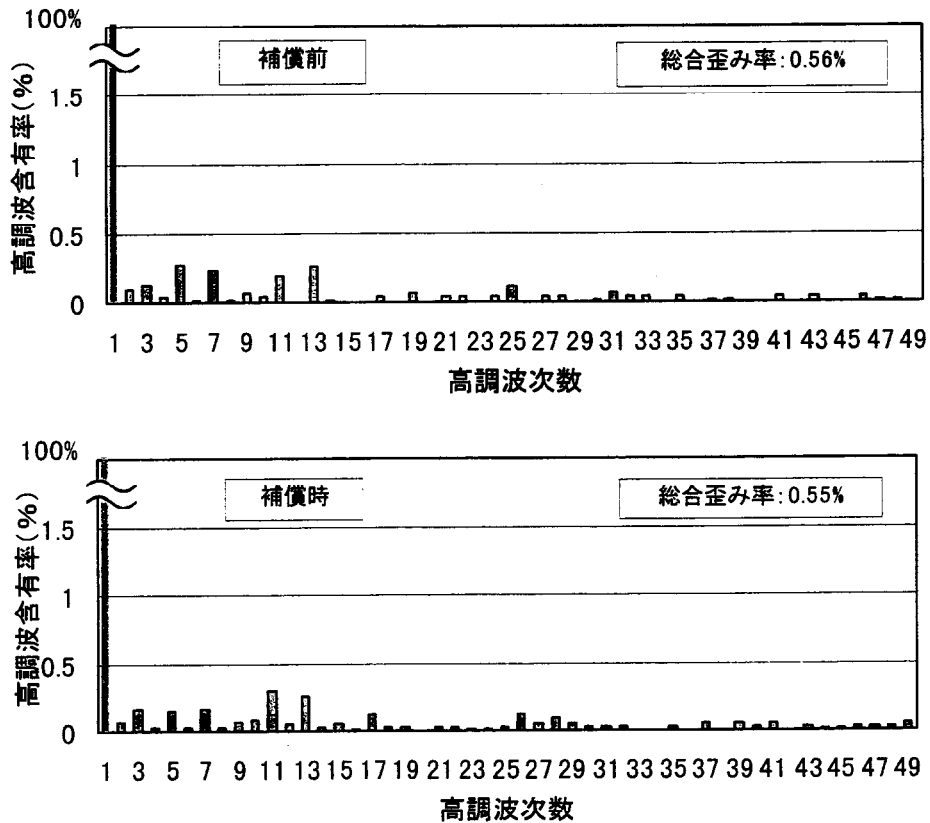


図5. 26 電圧高調波測定結果 (三相RL負荷)

図5. 27は、同様に系統電流の高調波スペクトラムを無補償時のデータと共に示している。

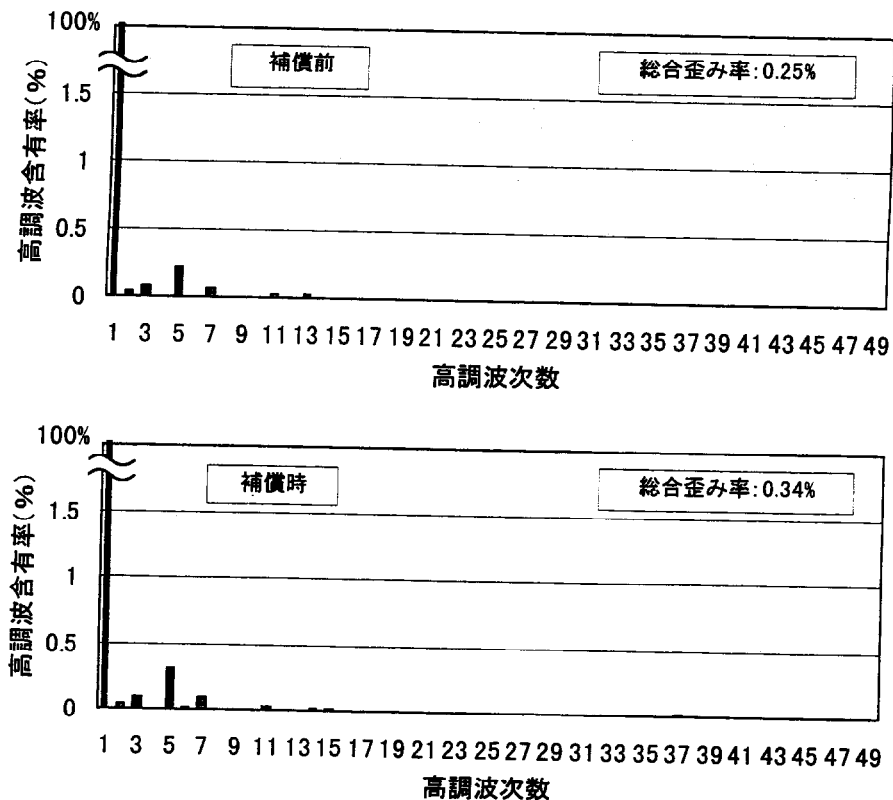


図5. 27 電流高調波測定結果 (三相RL負荷)

また、図5. 28補償装置自身の出力高調波電圧と電流の測定結果を示している。

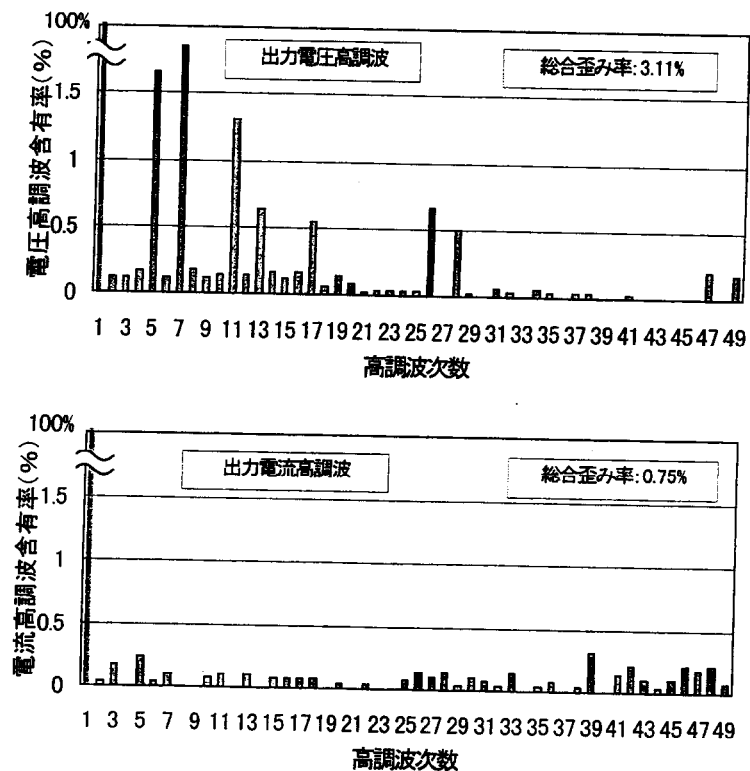


図5. 28 インバータ出力電圧，電流高調波測定結果（三相RL負荷）
そして表5. 2に、以上示した電圧，電流の総合歪み率をまとめて示している。

表5. 2 電圧，電流総合歪み率

	無補償時 負荷側	補償動作時 負荷側	補償時イン バータ出力
電圧歪み率	0. 5 6 %	0. 5 6 %	3. 1 1 %
電流歪み率	0. 2 5 %	0. 3 4 %	0. 7 5 %

これらの結果より、本装置の動作に伴う高調波の増加は問題ないことが分かる。これは、インバータ出力に高調波フィルタを設けていることと、もともと補償装置の出力電圧が重畳加算させる系統電圧に対して20%程度と小さいためである。

（4）保護動作確認⁽⁸⁰⁾⁽⁸¹⁾

図5. 29は系統過電流を想定した限流動作確認試験結果である。本試験では試験電源の都合上、60%電流で限流動作に移行する設定とし、50%のリアクトル負荷が接続されている状態で、更に50%のリアクトル負荷を投入して行った。図5. 29 aは動作を行わなかった時の波形，図5. 29 bは限流動作を行ったときの波形を示している。限流動作を行わない場合に比べて、限流動作により約61%に過電流が制限されていることが分かる。また、当然この期間負荷電圧は大幅に抑制されている。

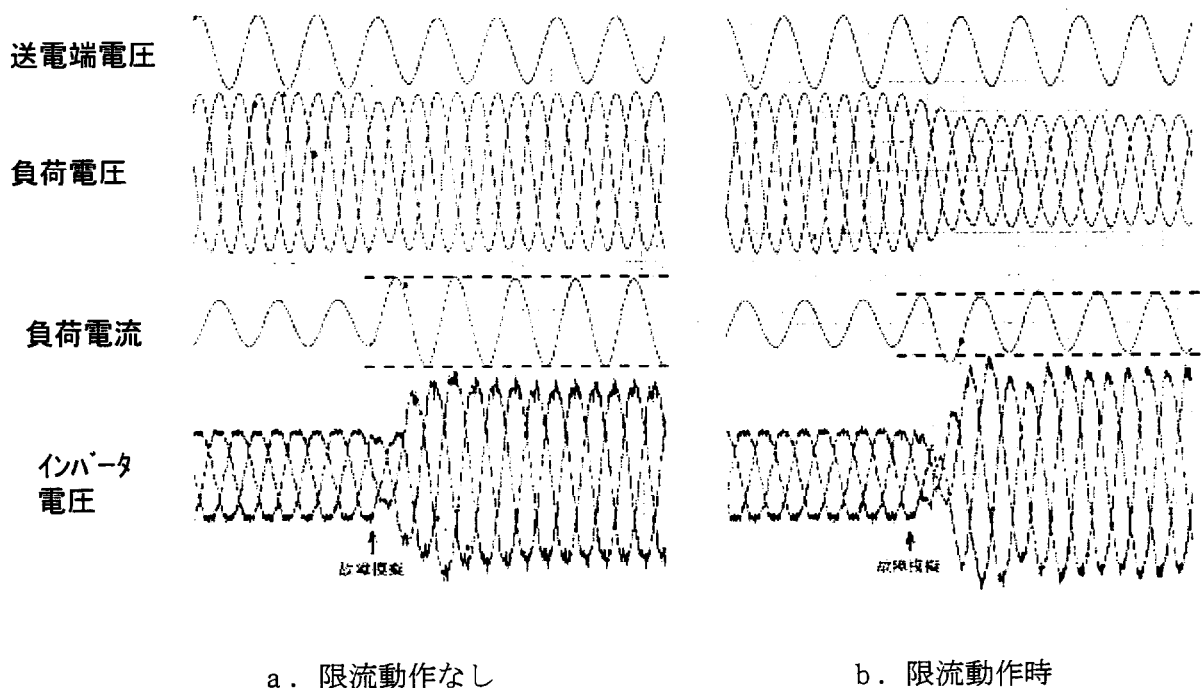


図5. 29 限流動作確認試験

次に、系統短絡事故を想定して、サイリスタスイッチによる装置短絡保護動作試験結果を

第5章 系統電圧の直列形補償器による安定化

にす。aは短絡事故時にインバータをゲートブロックして停止させたときの波形である。一方bは過電流によりインバータをゲートブロックすると共に、サイリスタスイッチを短絡させたときの波形を示している。短絡保護を行わない場合、インバータには約400%の過電圧が印加されるのに対して、短絡保護を行うことで過電圧の発生が理論通りに抑制されていることが分かる。

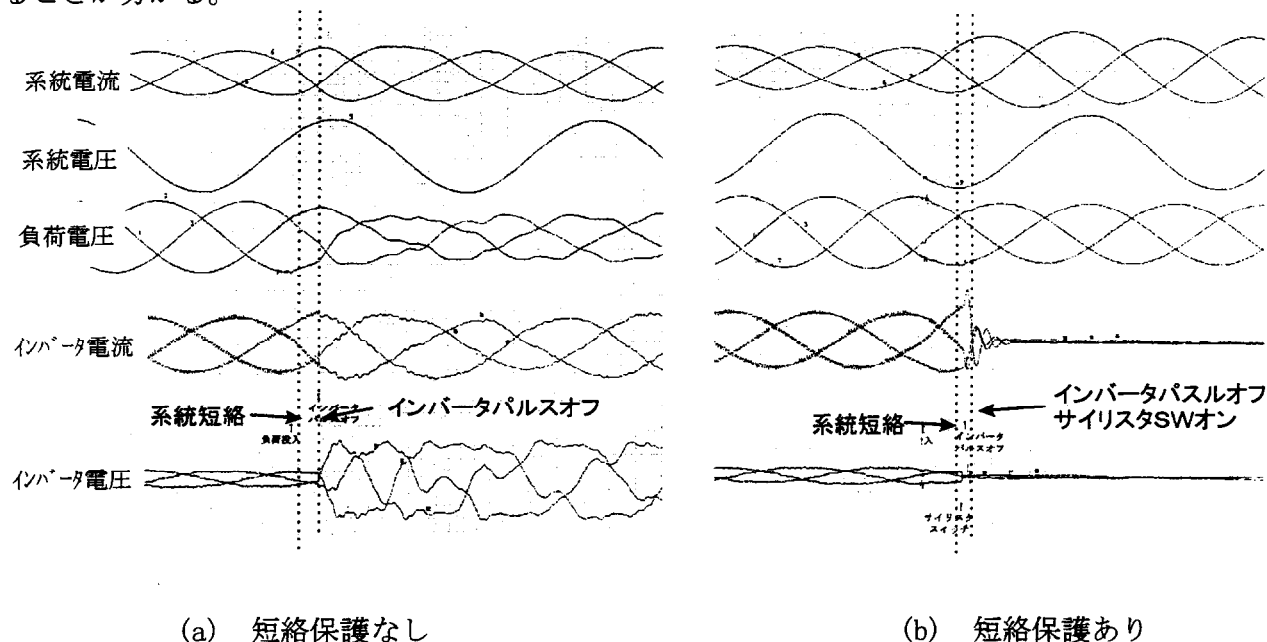


図5.30 短絡保護動作確認試験

(5) 考察

以上、実験結果より、概ね初期の性能を確認することが出来た。ここでは、より性能向上を導くために補償誤差の除去に関する考察を加える

今回性能検証した実験の制御では、電圧補償にフィードフォワード制御を適用した。このため、以下の原因により補償電圧に誤差が生じる可能性がある。

- ・系統インピーダンス定数の誤差
- ・装置内部インピーダンス

これらの誤差の影響を排除し、より精度良く制御を行うために、フィードバック制御系を構成することについて検討する。

① 装置内部インピーダンス誤差の除去

前述した制御系を簡略化して図5.31に示す。この場合、系統電流 I_t を検出し、この電流より出力指令であるリアクタンス電圧 V^* を計算し、この電圧をPWMインバータにより発生させて補償を行うフィードフォワード制御となっている。

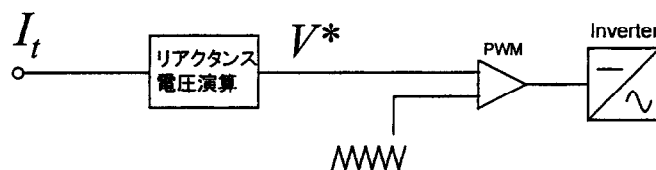


図5.31 フィードフォワード制御系

ここで、無視できない装置内部インピーダンスが存在すると出力電圧に誤差が生ずる。そこで指令値どおりの電圧を発生させるためには、実際の補償出力を検出し、これと指令値との偏差を調節器の入力とするフィードバック制御系とする必要がある。これをブロック図で表すと、図5.32のようになる。

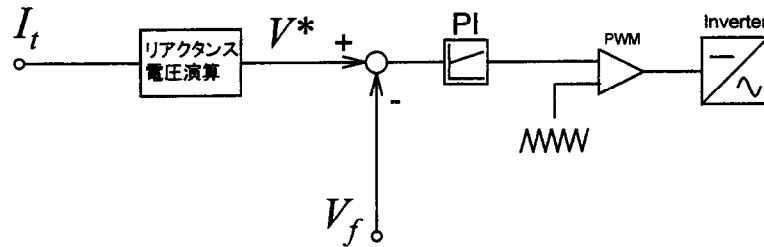


図5.32 内部インピーダンス誤差を除去するフィードバック制御

② 系統インピーダンス誤差の除去

送電線路インピーダンスを補償する可変リアクタンス装置では、あらかじめ補償すべきインピーダンス定数を設定して制御を行う。そこで、この設定が正確でなかったり、運用により系統インピーダンスが変化する場合には、過補償／不足補償となる。この問題を解決する制御ブロック図を図5.33に示す。本制御方式では、補償する負荷端の電圧値（実効値）を検出して、定格電圧との偏差を検出し、これをPI調節器に入力して、この出力をインピーダンスの補正として加えることによりリアクタンス電圧を調整するものである。

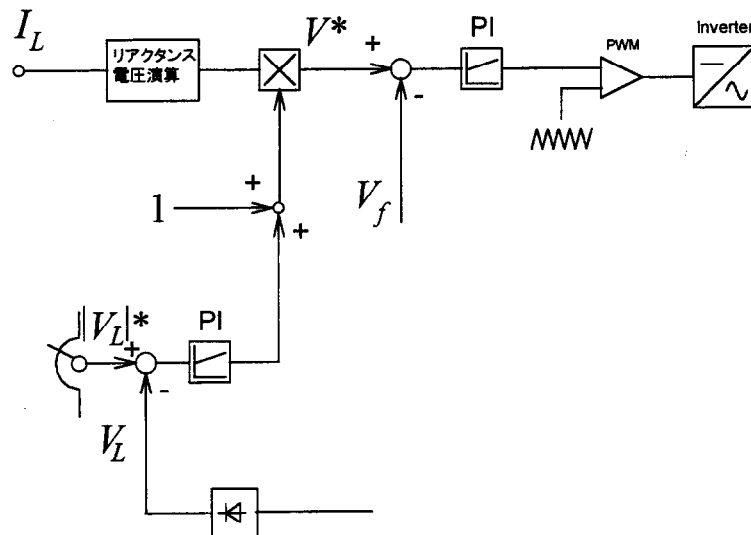


図5.33 系統インピーダンス誤差を除去するフィードバック制御

5. 4 瞬時電圧補償装置

5. 4. 1 装置構成と動作原理

装置下流側の負荷と線路リアクタンスに起因した電圧降下は、前章に述べた可変リアクタンス装置によって電圧補償が可能である。しかし、系統上流側の負荷や線路抵抗による電圧変動がある場合には、可変リアクタンス動作では完全な電圧補償が出来ない。

5. 2. 2節で述べたように、直列形補償器は、可変電圧源として任意の位相と振幅の電圧を出力して、系統電圧に加算させることができる。そこで、補償点の瞬時電圧（負荷側電圧）を検出し、これの目標電圧との差分を求め、この差電圧を出力電圧指令（瞬時値）として直列補償器に出力させれば、電圧の瞬時補償が出来る。

本装置は、可変リアクタンス装置と違い、出力電圧は線路電流に対して、必ずしも直角位相とはならない。このため、直列トランスを励磁するインバータの入力側に、系統に対して電力を入出力できるコンバータが必要となる。

本装置の構成と補償原理を

図5. 3 4に示す。

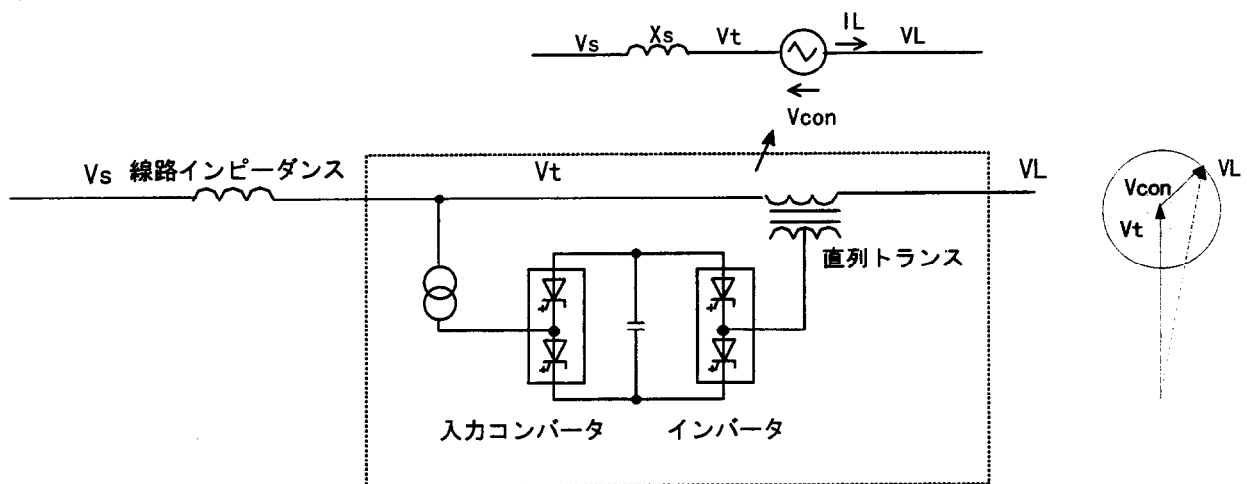


図5. 3 4 直列形補償器による電圧補償原理

5. 4. 2 制御⁽⁸³⁾

(1) 瞬時電圧補償の基本（単純な瞬時電圧補償）

図5. 3 5に瞬時電圧補償の基本制御系の構成を示す。本制御では、まず受電端電圧 V_t を検出し、2軸変換して電圧ベクトルを求める。そして、この電圧ベクトルと同相で大きさが1の単位ベクトルを求める。この電圧ベクトルを求める演算は、回転座標系で行うため、直流量（ $\cos \theta, \sin \theta$ ）で検出される。そして、この単位ベクトルに目標電圧 $|V_L^*|$ の振幅を乗算する。その後、演算した2軸目標量から逆変換して3相の交流目標電圧を求める。この目標値と実際値の引き算を行って、直列形補償器の出力すべき瞬時電圧を演算する。

このときの電圧／電流ベクトルの関係を図5. 3 6に示す。

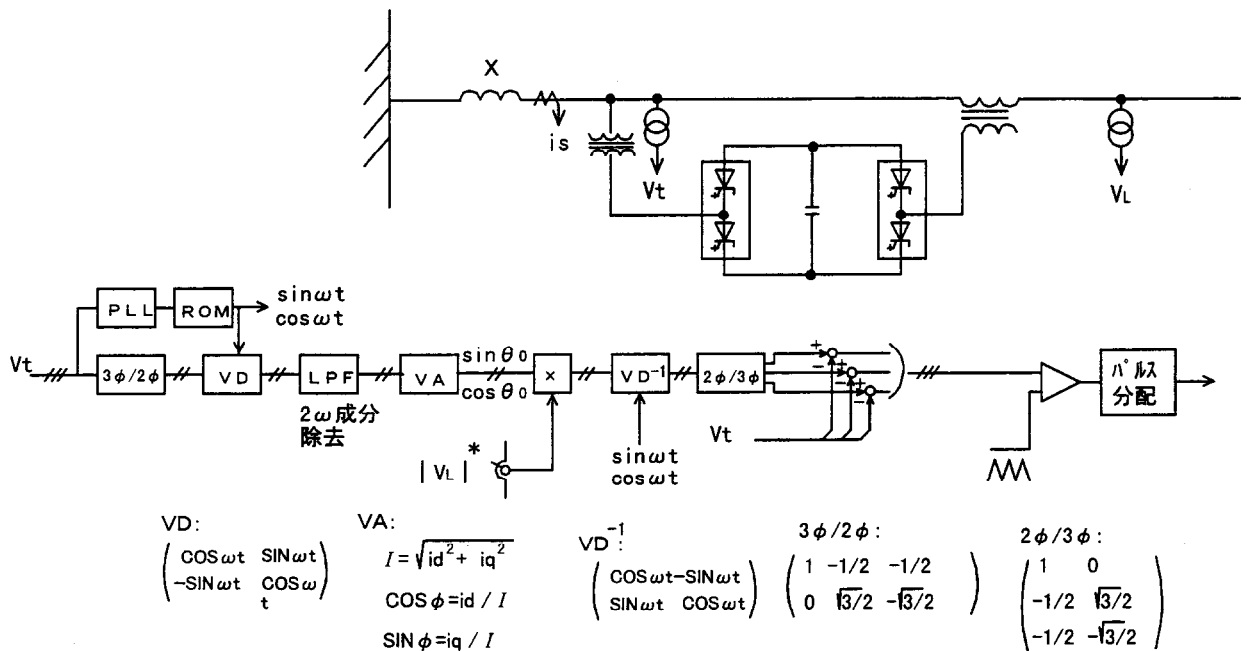


図 5. 3 5 瞬時電圧補償の基本制御ブロック図

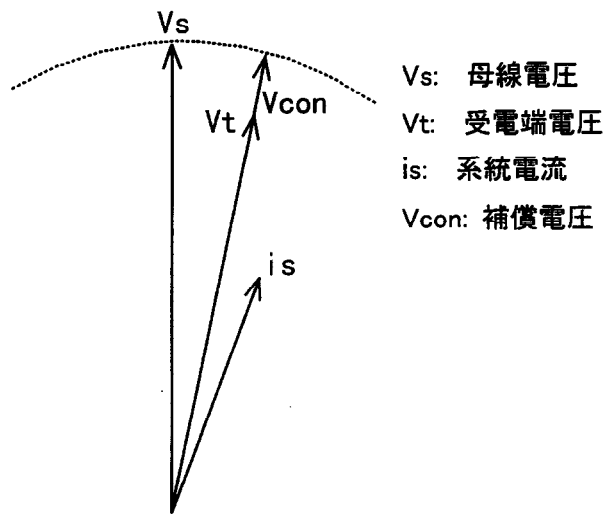


図 5. 3 6 瞬時電圧補償時の基本出力ベクトル図

本制御では、回転座標変換による直流量での位相検出を行うとき、系統基本波半周期の移動平均LPF（ローパスフィルタ）を用いることで逆相成分が除去され、受電電圧 V_t が不平衡であっても、指令電圧は3相平衡が保たれる。

(2) リアクタンス補償機能と組合わせた瞬時電圧補償

上記により、基本的な瞬時電圧補償が可能となるが、これに前節で述べた可変リアクタンス補償制御を組み合わせることを考える。この場合の制御構成を図5. 3 7に示す。

本制御系では、線路電流 I_s を検出し、これが線路インピーダンスを流れることにより降下するリアクタンス電圧 V_{xp} を演算する。この降下電圧 V_{xp} の演算結果を、別に検出した受電端電圧 V_t に加算し、この加算後の電圧と同位相の単位ベクトルを求める。そして、この単位ベクトルに目標振幅を乗算して目標負荷電圧ベクトルを求める。これを三相の交流電圧に変換してを演算し、受電端電圧実際値 V_t との差分から直列形補償器の出力目標電圧を導く。

これを、ベクトル図で示すと、図5. 38となる。

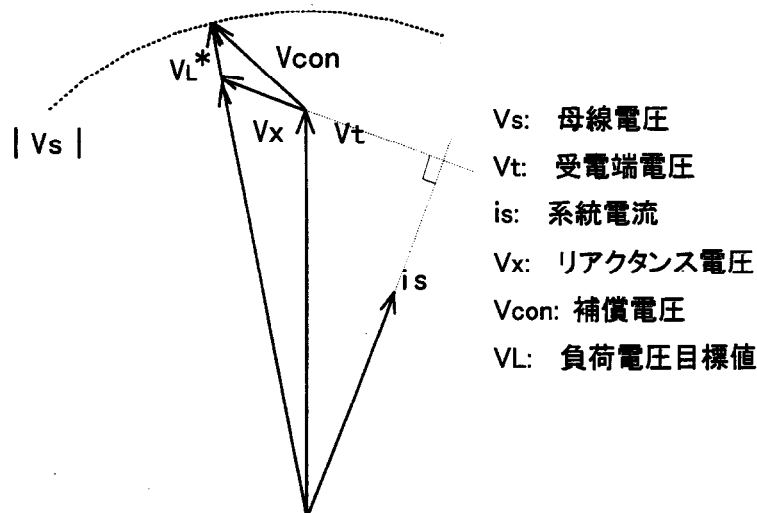


図5. 38 リアクタンス補償機能つき瞬時電圧補償のベクトル図

この制御方式の場合、系統線路のリアクタンス電圧降下を考慮しているため、系統の負荷が補償装置下流側のみにある場合には、補償後の電圧位相は母線電圧 V_s 位相に一致する。また、この場合も補償後の電圧は3相平衡化される。

(3) リアクタンス補償機能付き瞬時電圧補償の特徴

以上に示した本制御方式の特徴を示す。

- ① 下位側負荷による送電線路リアクタンス電圧降下と位相変動を補償可能
- ② 上位側で発生した電圧変動を補償可能
- ③ 送電線路抵抗による電圧降下を補償可能

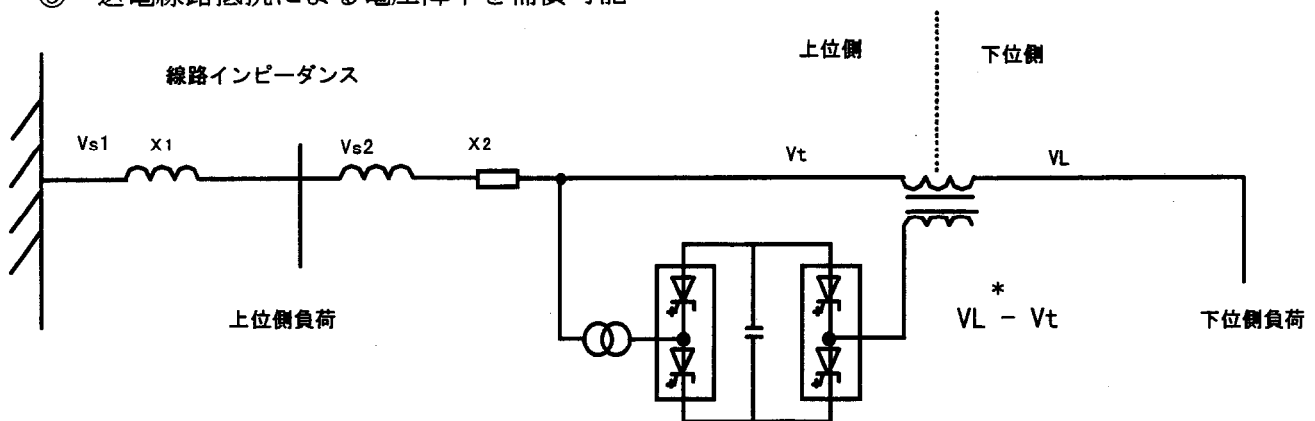


図5. 39 リアクタンス補償機能つき瞬時電圧補償装置の構成

第5章 系統電圧の直列形補償器による安定化

図5.40は、線路インピーダンスがリアクタンス成分のみとして見なせる場合において、単純電圧補償及び補償無しの場合と共に、本制御方式の補償動作を概略比較した図である。本制御方式は、単純に瞬時電圧補償を行う場合に比べ、補償する負荷電圧の位相補償ができる点が大きな特徴といえる。従って、第2章で述べたP-V特性を考慮すると、同図に示す通り限界電力の大幅な増加が実現でき、本方式は単純な瞬時電圧補償に比べ、送電可能な電力の増強効果が期待できる。

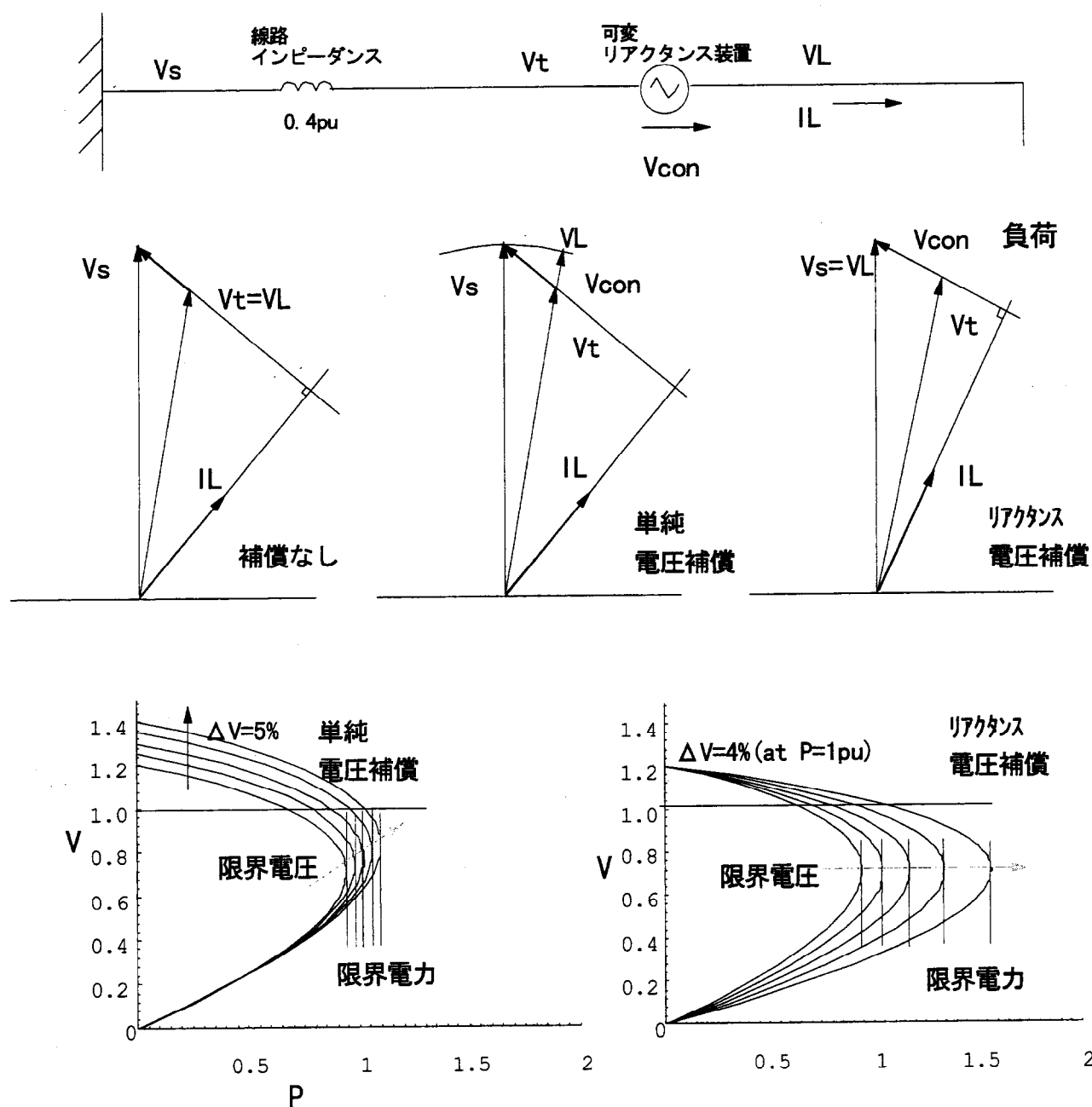


図5.40 リアクタンス補償機能つき瞬時電圧補償装置の特徴

5. 4. 3 シミュレーション

シミュレーションにより、本装置の動作性能を解析した。

図5. 4 1は、シミュレーションモデルを示す。ここでは、インバータは三相フルブリッジ15パルス（750Hz）インバータとし、直流回路には電圧源を用いた。また、インバータ出力に共振周波数300Hzの高調波フィルタを設けた。系統インピーダンスは0.2 puとし、これに電圧補償装置が接続した構成で、補償装置の下位側L及びR負荷投入による電圧位相変動補償効果と、上位側（電源側）のL負荷投入による電圧変動の補償性能の解析を行った。

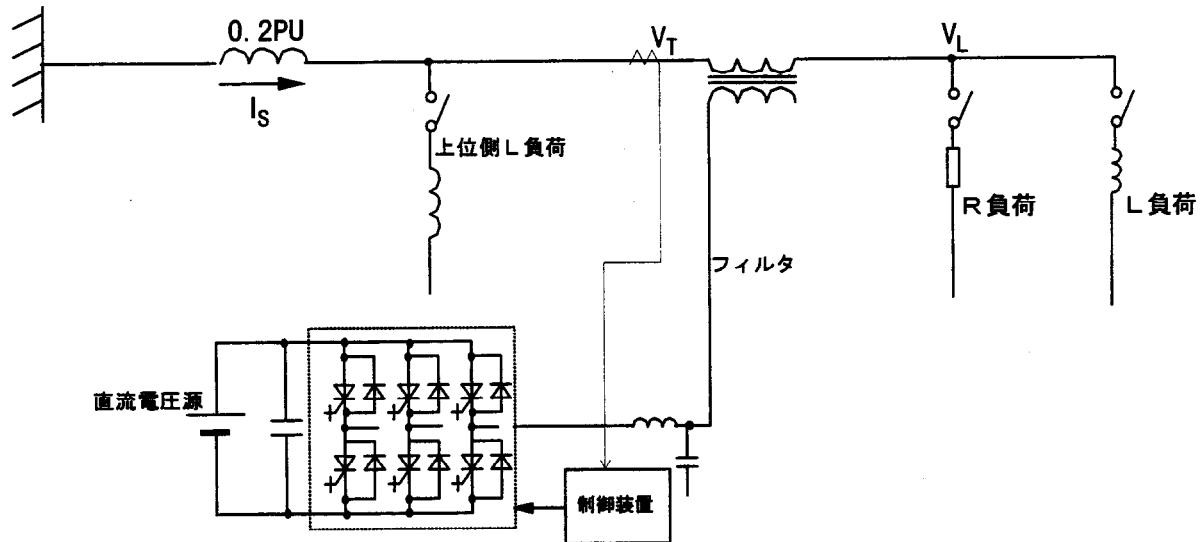


図5. 4 1 瞬時電圧補償装置のシミュレーションモデル

(1) 下位側L負荷による電圧変動の補償

図5. 4 2に補償装置設置点下位側で三相リアクトル（1 pu）が投入された場合の補償特性を示す。負荷の投入により、系統電流が増加し、この電流によりリアクタンス電圧降下が生じて受電端電圧が約20%低下している。しかし、負荷端電圧は補償装置が機能し、1 ms以内でほぼもとの電圧に補償されていることが分かる。

(2) 下位側抵抗負荷による電圧位相変動の補償

補償装置設置点下位側で1 puの三相抵抗負荷が投入された場合の電源位相の補償の様子を図5. 4 3に示す。これより抵抗負荷電流が送電リアクタンスを通過することにより、受電端電圧の位相が母線電圧にたいして遅れ位相となるにもかかわらず、負荷端電圧は母線電圧位相とほぼ同位相になっており、本補償方式により理論通り、負荷端電圧の位相が補償されることがわかる。

(3) 上位側負荷による電圧変動の補償

図5. 4 4に、補償装置の設置点より上位側（電源側）で1 puの三相負荷（リアクトル）を投入したときの応答を解析した。これより、並列補償装置では困難である上位系統での電圧変動の補償が、本補償方式により問題なく行えることが分かる。

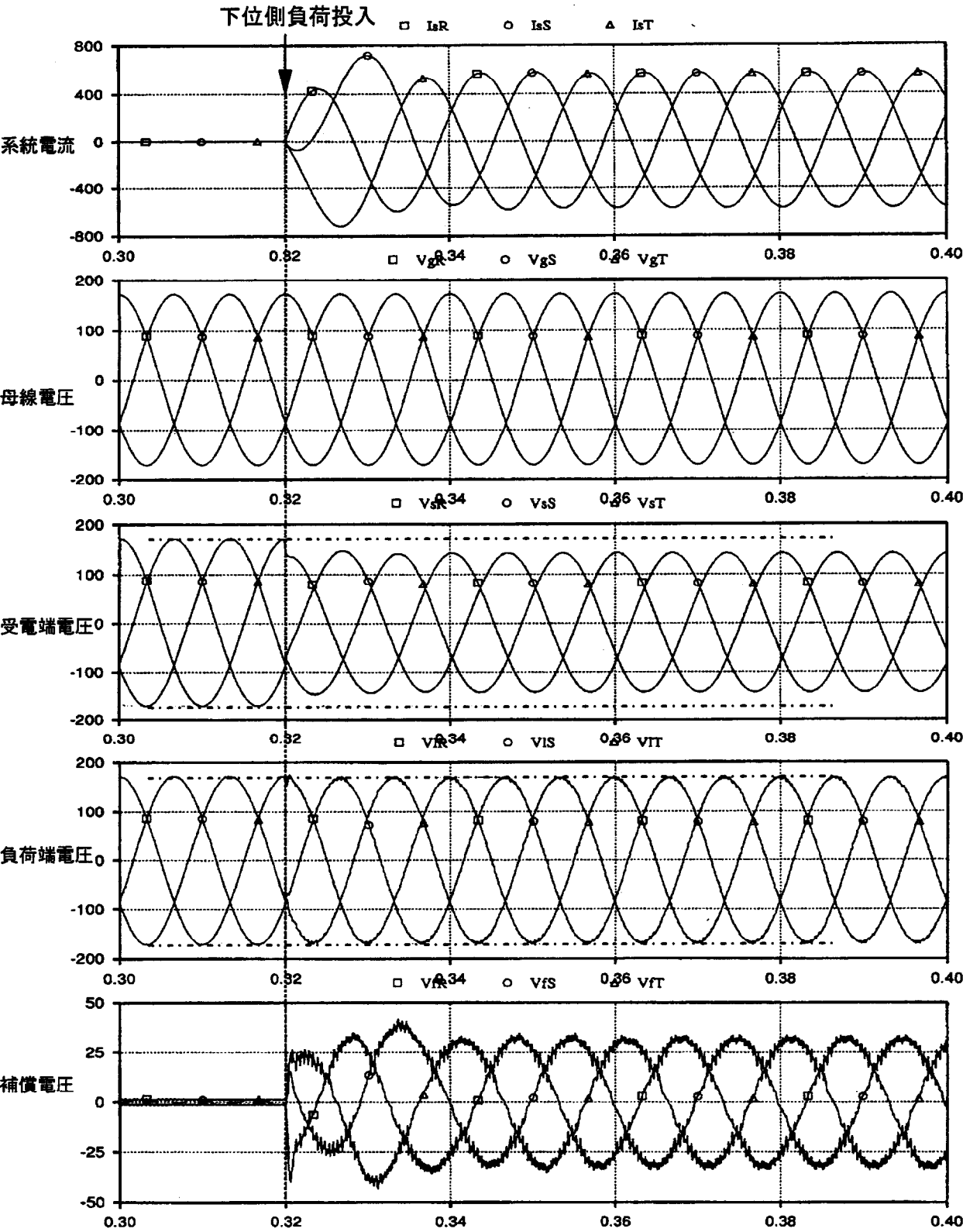


図 5. 4 2 下位側負荷による電圧変動の補償解析結果

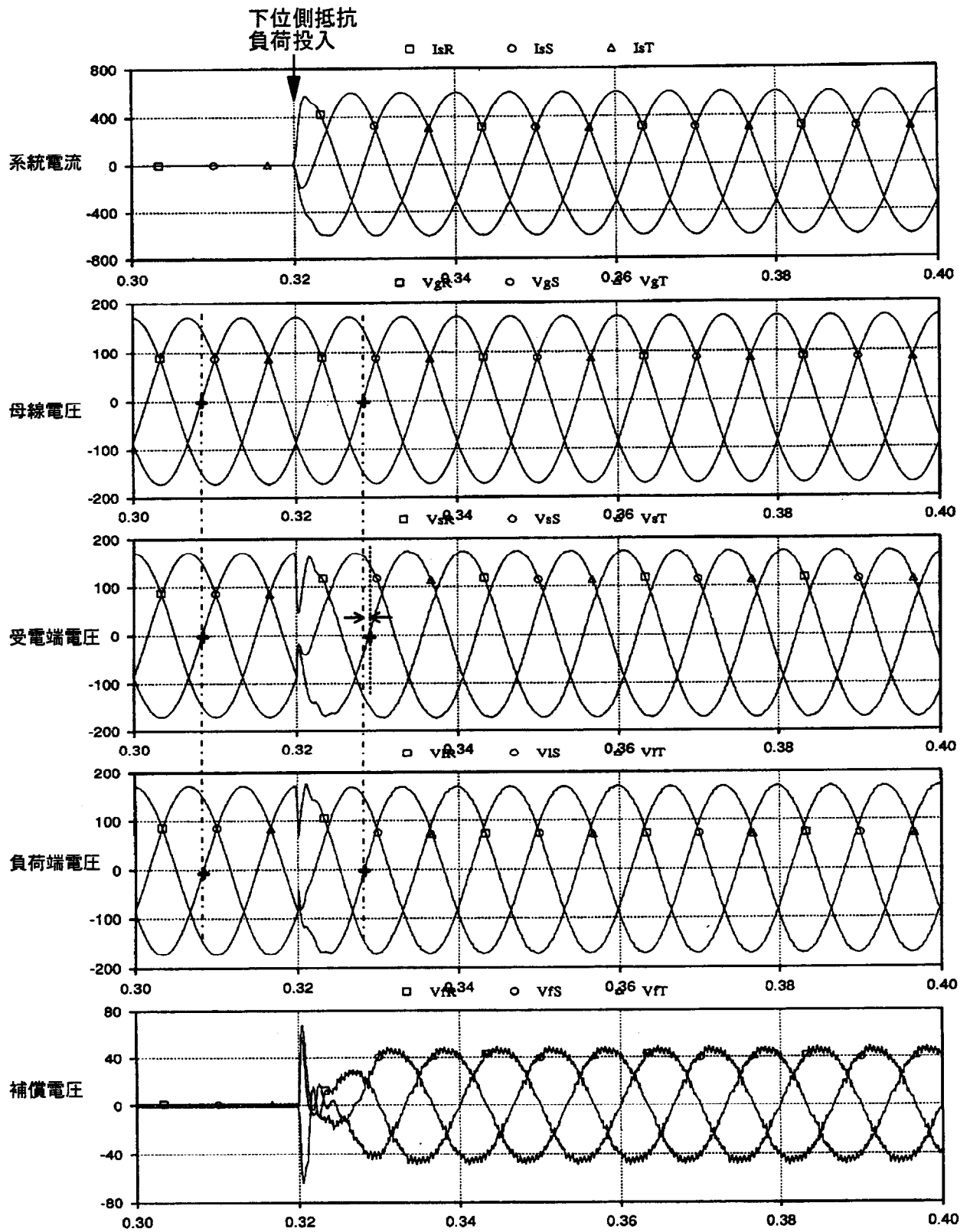


図5.43 下位側抵抗負荷による電圧位相変動の補償解析結果

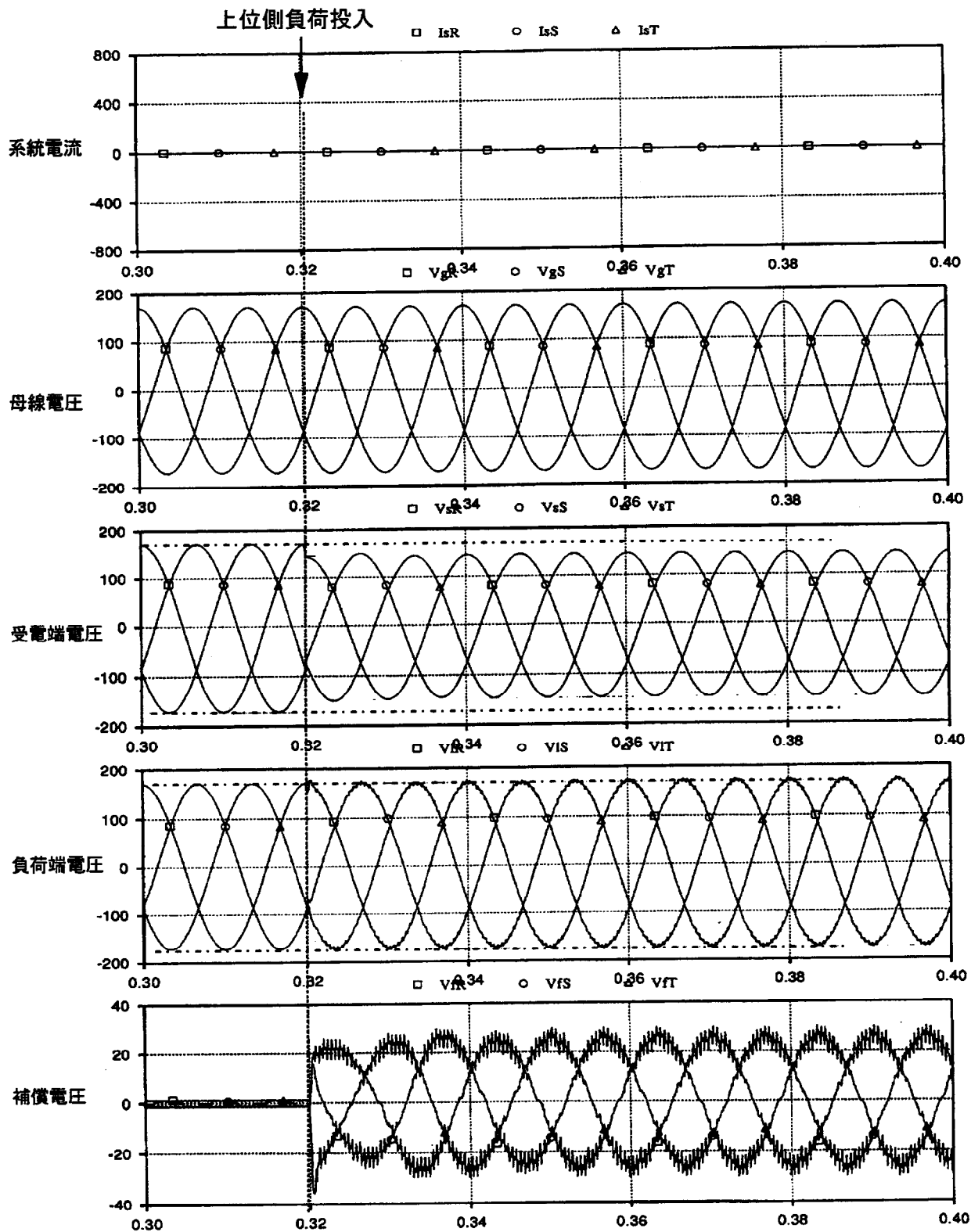


図5.44 上位側負荷による電圧変動の補償解析結果

5.4.4 実験

実験装置の構成を図5.45に示す。また、仕様を表5.3に示す。本装置では、主変換器として、単相3台で構成される三相IGBTインバータを2多重で構成している。この直流側には、主変換器が系統との間で入出力する電力処理を行って直流電圧を一定に保つためのIGBT式PWMコンバータを付加した。インバータの電圧制御は正弦波／三角波によるPWMとし、キャリア周波数は大容量化を想定して、通常のIGBTインバータとしては低い1350Hzとした。この仕様を以下に示す。

本実験装置を用いて、補償性能の静特性および動特性を実験確認した。

表5.3 瞬時電圧補償実験装置の仕様

項目	仕様
容量	4 kVA
補償電圧	25%max
素子	IGBT(6MB120-060)
変換機構制	単相×3相×2多重
電圧制御	正弦波／三角波PWM
スイッチング周波数	750Hz

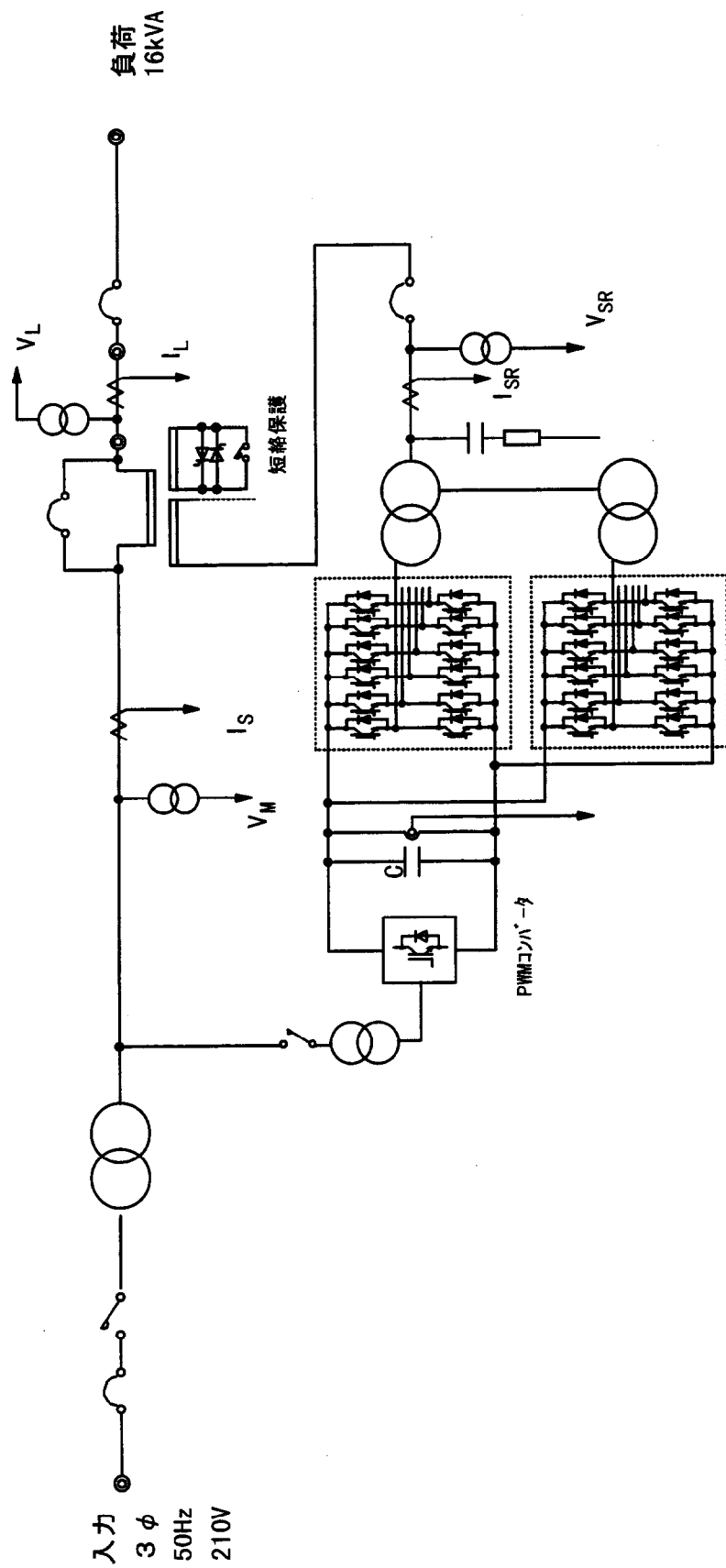


図5. 45 瞬時電圧補償実験装置

(1) 電圧補償静特性1 (下位側負荷による電圧変動)

補償装置設置点下位側(負荷側)の負荷変動による電圧変動の補償特性を測定した。

図5. 46は三相平衡リアクトル負荷の負荷率に対する負荷電圧を示している。これより所期の電圧補償の行えていることが分かる。

また、図5. 47は単相リアクトル負荷を接続したときの不平衡率を示している。この場合、不平衡率は補償前の1/3程度に補償されている。これが完全に補償できないのは、制御系内のフィルタ等による位相誤差が原因と考えられる。

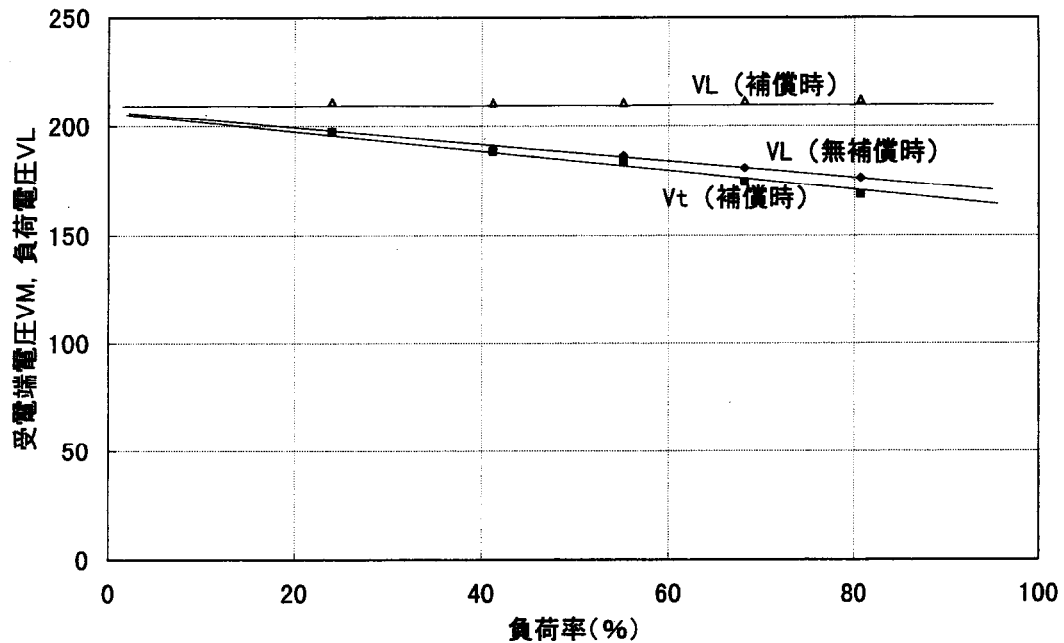


図5. 46 電圧補償静特性 (下位側三相リアクトル負荷)

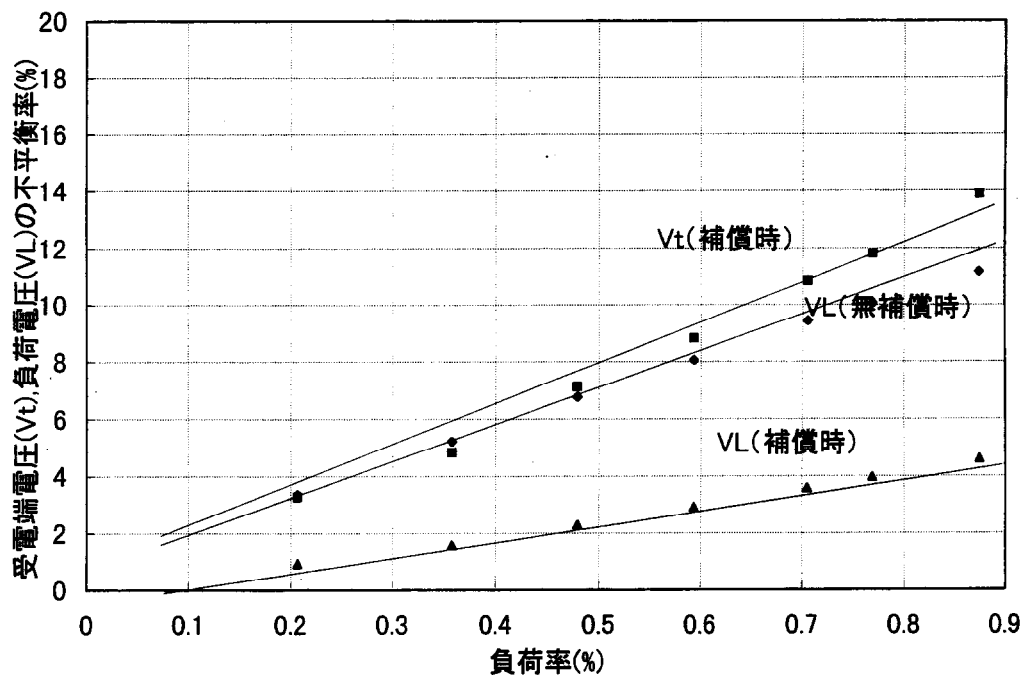
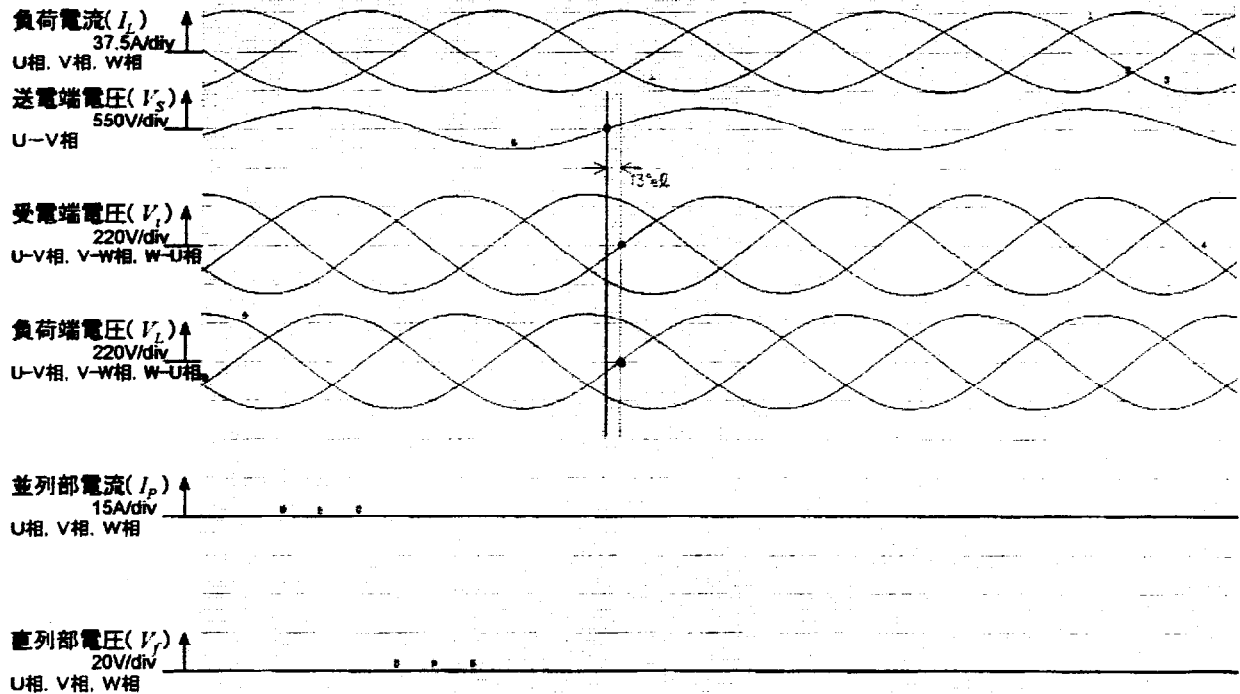


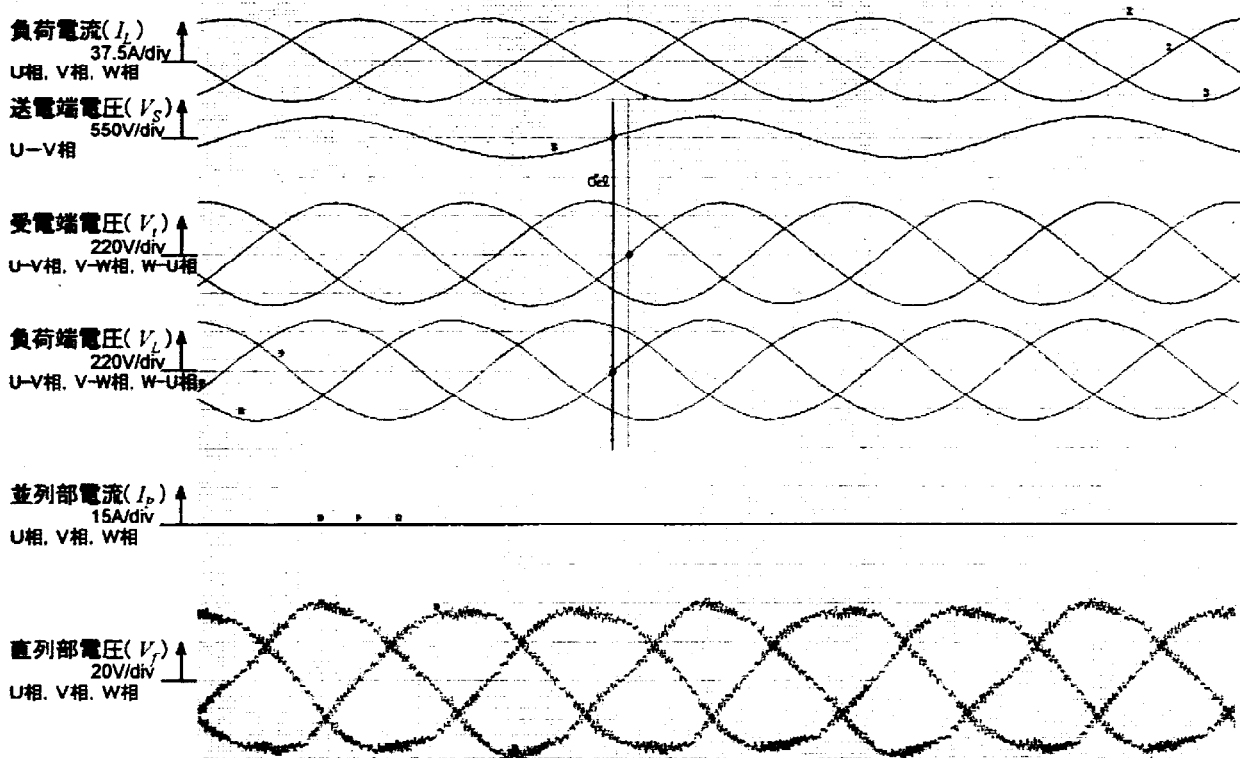
図5. 47 電圧補償静特性 (下位側単相リアクトル負荷)

第5章 系統電圧の直列形補償器による安定化

また、図5. 48は三相抵抗負荷を接続したときの各部電圧，電流波形を示している。これより、無補償時には受電端電圧 V_t と負荷端電圧 V_L は母線側の電圧に対して約 13° 遅れるが、補償時には負荷端電圧 V_L は、母線電圧のそれとほぼ同位相となっており、瞬時電圧補償を行う本補償方式により、電圧位相も所期の補償が行えることが分かる。



(a) 無補償時



(b) 補償時

図5. 48 電圧位相補償（下位側三相抵抗負荷）

(2) 電圧補償静特性2 (上位側負荷による電圧変動)

本試験により、補償装置設置点上位側（電源側）負荷による電圧変動の補償特性を取得した。図5. 49は、補償装置下位側に50%の三相リアクトル負荷ある系統で、更に、上位側にリアクトル負荷を接続しこの容量を変化させたときの補償特性を試験した結果である。無補償に対し、可変リアクタンス補償を行うと、下位側負荷に対する電圧降下を補償できる。しかし、上位側の負荷による電圧変動の補償はできない。一方、瞬時電圧補償なら、下位側、上位側負荷にかかわらず負荷電圧を一定に補償できることが分かる。

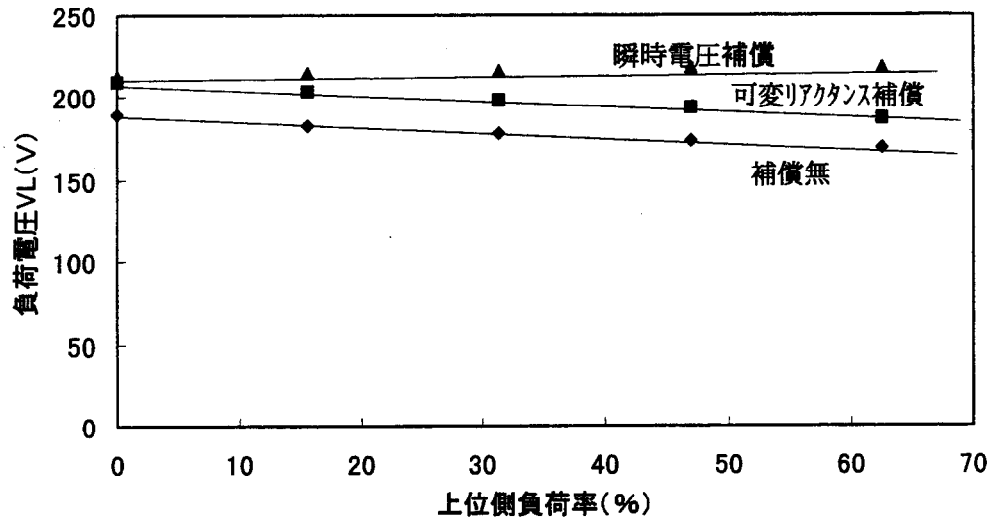


図5. 49 電圧補償静特性 (上位側三相リアクトル負荷)

図5. 50は、補償装置下位側に50%の三相平衡リアクトル負荷がある状態で、上位側で単相リアクトル負荷を接続したときの不平衡補償特性である。可変リアクタンス装置の場合、上位側負荷による不平衡補償はできないため、無補償時と同様の不平衡率となる。これに対し、瞬時電圧補償装置は、この不平衡を1/2以下に改善できているのが分かる。なお、完全な補償ができていないのは、図5. 47の場合と同様に基本的にフィードフォワード制御を行う本制御系の演算誤差によるものと考えられる。

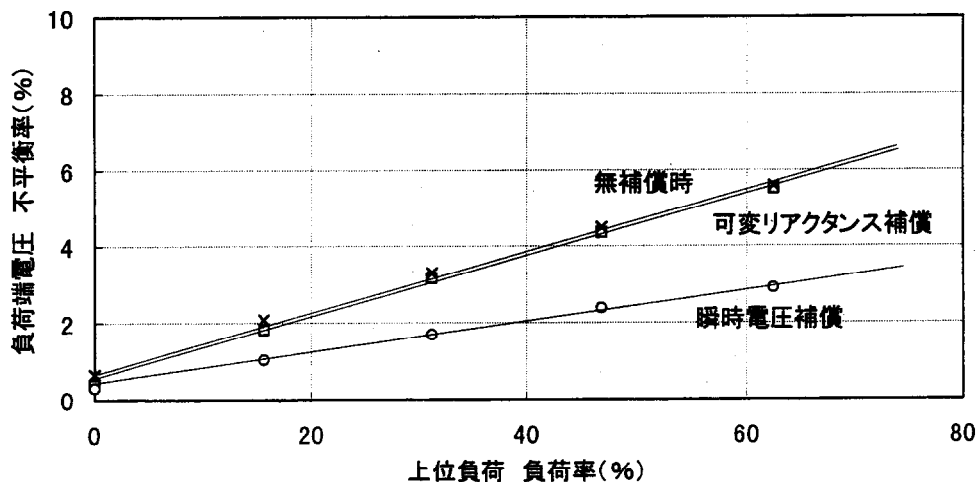


図5. 50 電圧補償静特性 (上位側単相リアクトル負荷)

(3) 過渡特性試験

図5. 5 1に下位側三相リアクトル負荷 (10kVA) を投入したときの応答波形を無補償時と対比して示す。また、図5. 5 2に上位側の三相リアクトル負荷 (10kVA) を投入したとき、補償有り無しの応答波形を示す。

これらの過渡応答試験結果より、系統上位側負荷或いは下位側負荷による電圧変動に対して、いずれも数ms程度の応答時間で高速な補償のできていることが分かる。

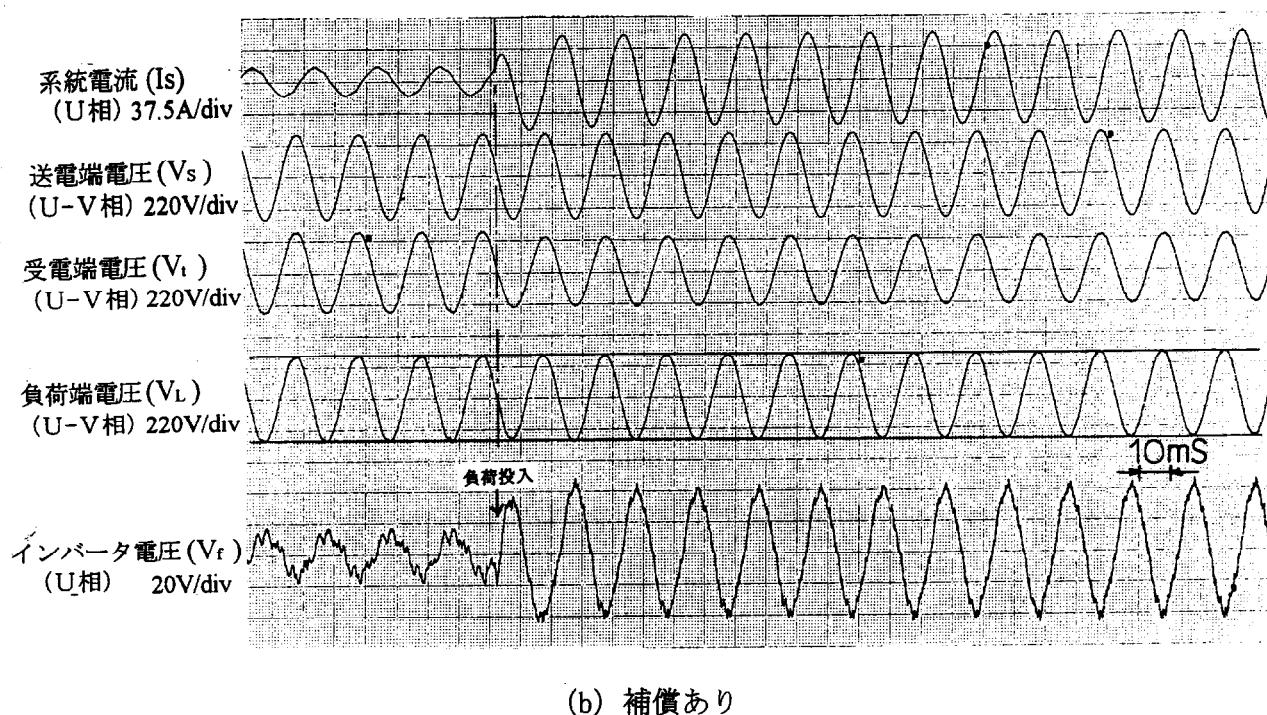
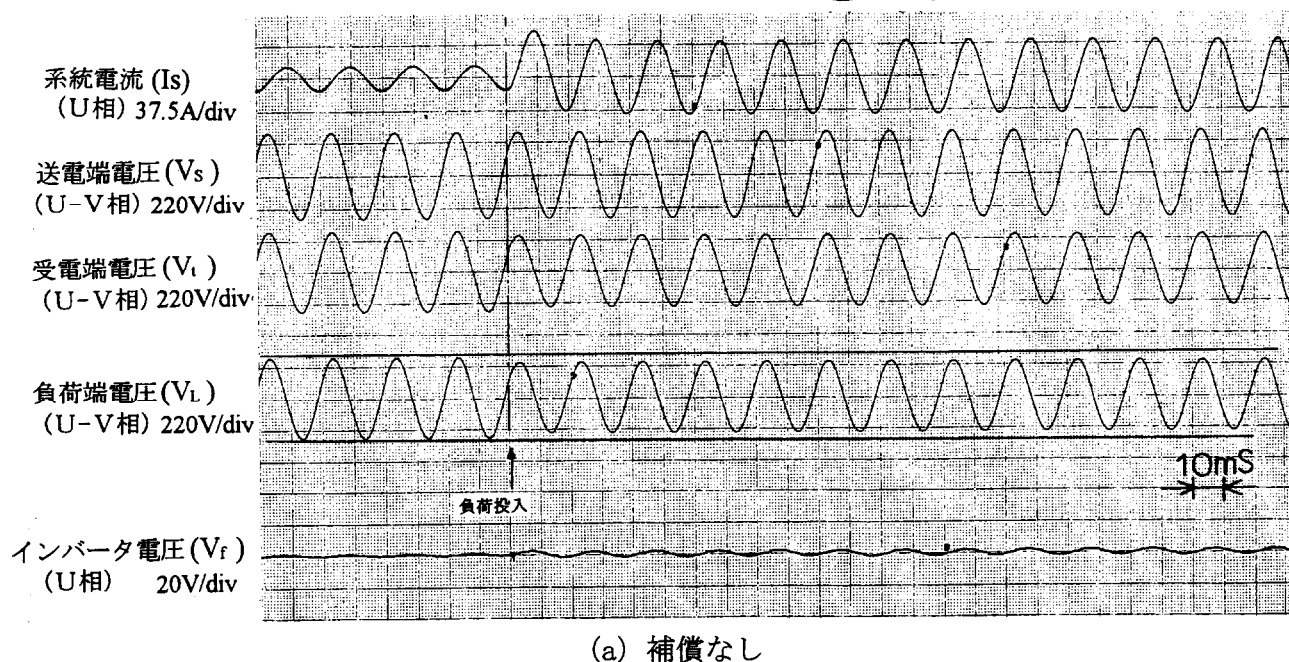
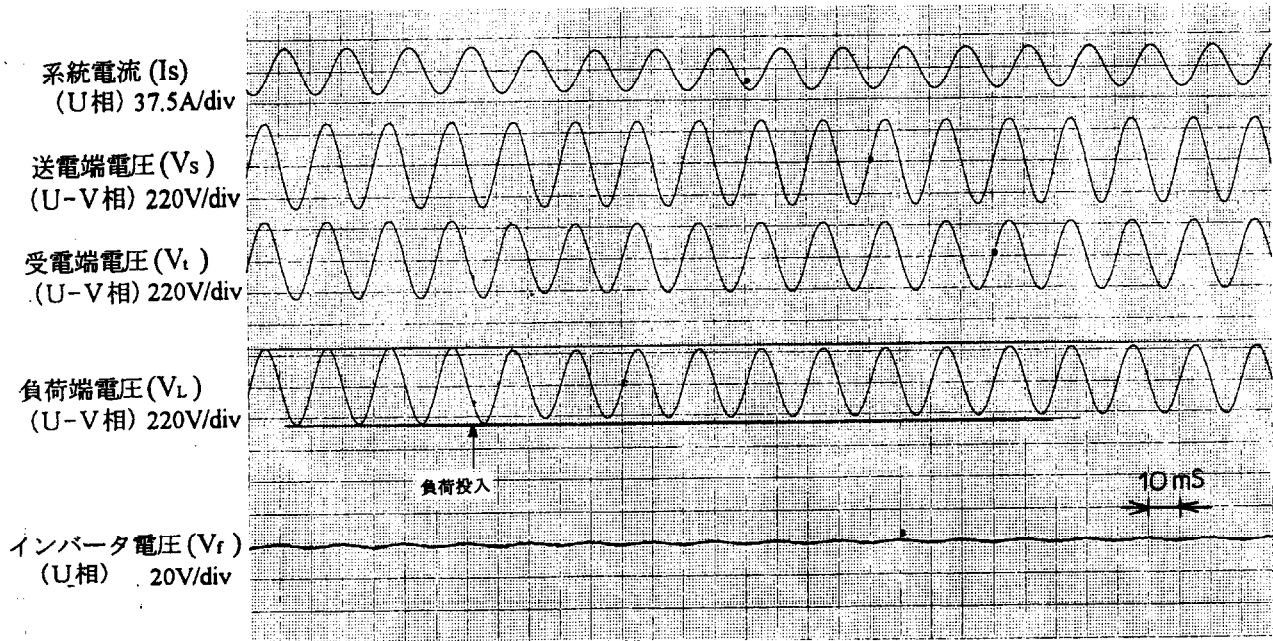
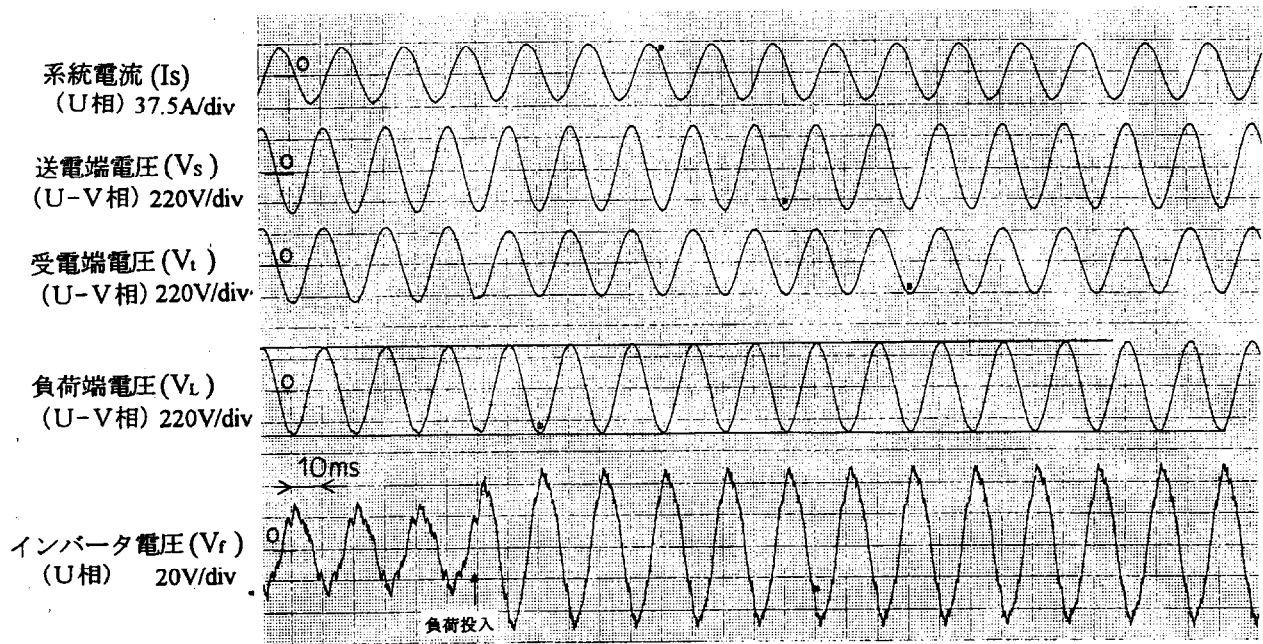


図5. 5 1 過渡応答試験結果 (下位側三相リアクトル負荷)



(a) 補償なし



(b) 補償あり

図5.52 過渡応答試験結果 (上位側三相リアクトル負荷)

5. 5 考察

以上の通り、新しい電圧補償器である直列形補償器の応用として、可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置について示した。これらは、直列補償器であるため、いずれも系統の下位側のみの電圧補償を行うが、前述の特徴を比較して示すと表5. 4の通りとなる。

表5. 4 可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置の比較

比較項目		可変リアクタンス装置	瞬時電圧補償装置
構成	入力コンバータ	原理的に不要	要
	検出	入力電圧, 電流	入力電圧, 電流 出力電圧
	制御	平均値制御	瞬時値制御
下位側負荷 による変動	線路リアクタンス電圧降下	○	○
	線路抵抗分電圧降下	×	○
	電圧位相	○	○
	不平衡	○	○
上位側負荷 による変動	電圧	×	○
	不平衡	×	○
性能	応答時間	1 0 m s	1 m s

○：補償可

×：補償不可

以上により、可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置の適用区分は次の通りとなる。

(1) 可変リアクタンス装置

入力コンバータが不要であり、電圧検出点も少なく済むなど、装置構成が簡易となる。また制御も高速な瞬時値制御を必要とせず、平均値制御で良いため、比較的大容量化に適する。但し、上位系統による電圧変動には対応できず、また、下位側負荷による変動であっても送電線路の抵抗分による電圧降下の補償はできない。従って、配電系統より上位の系統、基幹系統での使用に適すると考えられる。

(2) 瞬時電圧補償装置

入力コンバータが原理的に必要であり、検出点も多い。また制御も高速制御が要求され、大容量化は可変リアクタンス装置に比べて不利である。しかし、機能、性能は前者に比べて大幅に向上し、上位系統での電圧変動、不平衡や送電線路の抵抗性分による電圧降下も補償が可能である。更に、本論文では示さなかったが、高調波補償も原理的に可能である。従って、配電系統以下、需要家端近傍での設置に適すると考えられる。

5.6 まとめ

本章では電力系統に直列接続されて電圧補償を行う直列形補償器について述べた。これは、高速移相器と同様の構成をしており、制御方式によって、①可変インピーダンス ②電圧調整 ③移相調整 の各機能を実現できる。本章では、これらのうちで、可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置について述べた。以下に本章で得られた結果をまとめる。

- (1) 可変リアクタンス装置は、系統に直列接続され、系統電流位相に対して常に直交位相の電圧を出力し、等価的に直列可変リアクタンスとして動作する装置である。そこで、これを直列コンデンサとして動作させれば、系統の誘導性リアクタンスを相殺し、これによる電圧降下を補償できることを示した。
- (2) 可変リアクタンス装置の主回路構成方法を示し、不平衡補償までを考慮した制御方式を述べた。また、直列形装置で留意すべき系統短絡故障時の過電流に対する保護として、リアクトル動作による限流機能と、3巻線トランスを用い、この3次巻線をサイリスタスイッチで短絡する保護方法を示した。
- (3) これらの制御及び保護性能はシミュレーションと実験により確認した。シミュレーションでは、負荷急変時に、直列コンデンサが低周波振動を引き起こすのに対して、極めて安定な応答のできることを示した。
- (4) 実験では、静特性を取得し、電圧変動をほぼ零に改善し、不平衡電圧を1/5以下に補償できることを検証した。また、過渡特性と高調波、系統過電流に対する保護動作についても実験評価し、所期の性能であることを示した。
- (5) 補償誤差について考察し、これが系統インピーダンスの誤差と装置内部インピーダンスによるものであることを述べ、これに対する対策法方を示した。
- (6) 瞬時電圧補償装置は、系統に直列接続され、その出力電圧を直接加算する形で電圧補償動作を行う。可変リアクタンス装置では、系統上位側での電圧変動の補償ができなかったのに対して、この装置では問題なく補償できる特徴があることを示した。
- (7) この装置の制御方式として、リアクタンス補償機能までを具備させた瞬時電圧補償制御を示した。これは単純な瞬時電圧補償と比べ、以下の特徴のあることを述べた。
 - ① 下位側負荷による系統リアクタンス電圧降下と位相変動の補償可能
 - ② 上位側で発生した電圧変動を補償可能
 - ③ 系統線路の抵抗成分による電圧降下の補償可能
- (8) この装置に対して、まず実用モデルに対してシミュレーションを行い、上位側及び下位側負荷による変動が1ms以内で補償できることを示した。また、位相変動も理論通り補償できることを示した。
- (9) 実験により、上位側、下位側負荷に対する電圧変動と不平衡及び位相変動に対する補償特性を求め、良好な改善効果を確認した。特に、上位側負荷については、可変リアクタンス装置の場合と比較し、瞬時電圧補償の利点を明確に示した。また、過渡応答も数msで応答できることを示した。
- (10) 以上の可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置両者を比較し、前者が上位系統（基幹系統）での電圧補償に適し、後者は配電系統以下の比較的小容量領域での使用に適することを示した。

第 6 章

系統電圧の直並列形補償器による安定化

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

6. 1 まえがき

前章までに、系統電圧補償装置として直列形補償器と並列形補償器双方の補償特性を述べ、それぞれの特徴を活かした補償装置の応用を示した。本章では、これら直列形補償器と並列形補償器を一体化した、更に高機能な系統補償装置である直並列形補償器について述べる。

既に述べた通り、直列形補償器は装置設置点下位側の電圧変動と不平衡を理論上完全に補償可能である。これは、系統上位側に起因して発生した電圧変動であってもその機能を果たす。一方、並列形補償器は下位側の負荷の取る無効電力や逆相電力を補償することにより、系統下位側のみならず上位側に対しても負荷電流による電圧変動と不平衡を改善することが可能である。直並列形補償装置は、これらの特徴を活かすものであり、例えばこの装置を系統中間点に設置するれば、系統の上位側、下位側それぞれで発生した電圧変動を一括して本装置で補償することが期待できる。本章ではまず、この補償装置の原理と構成を示し、電圧補償動作を実現するための制御方式を示す。そして、実験によりその性能を検証する。特にこの実験では、これまでに述べた直列補償及び並列補償とその補償特性を比較して評価する。更に、本装置の配電系統への適用を想定したフィージビリティスタディーについて述べる。

6. 2 基本構成と動作原理

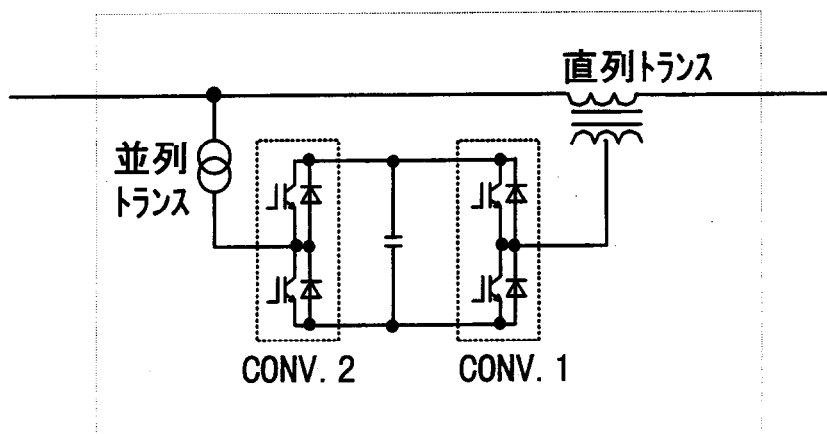


図 6. 1 直並列形補償器の基本構成

直並列形補償器の基本構成を図 6. 1 に示す。本装置は直列補償部と並列補償部からなる。直列補償部は、系統に直列接続される直列トランスとこれを励磁するインバータ（CONV. 1）からなる。また、並列補償部は並列トランスとインバータ（CONV. 2）とから構成される。この装置の等価回路は図 6. 2 の通りである。

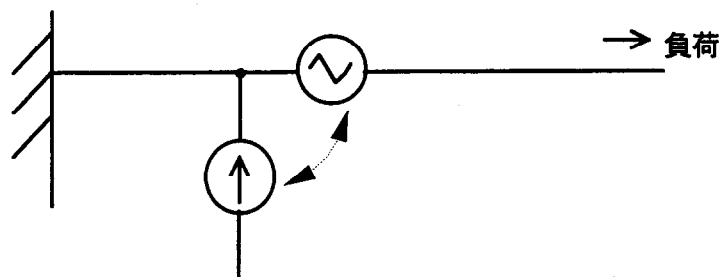


図 6. 2 等価回路

直列補償部は系統に直列接続される電圧源として、また並列補償部は系統に並列の電流源として表される。4章及び5章で述べたように、直列部は系統電圧に補償電圧を直接加えることで電圧補償を行い、並列部はSVCと同様に無効電流を系統に注入することで電圧補償を行う。これらはいずれも補償範囲については連続無段階の電圧変動補償に加えて、三相不平衡や電圧動揺の補償が可能であるが、以下の特徴を持つ。

① 直列補償の特徴：

- ・ 補償範囲（補償対象）は系統下位側のみ（片方向）
- ・ 上位側及び下位側双方で発生する電圧変動，不平衡，動揺を問題なく補償可
- ・ 送電線の抵抗分による電圧降下の補償も可能
- ・ 送電線リアクタンスの補償可能
- ・ 装置容量は通過電流と補償電圧の積で決まり、並列補償に比べて、一般に所要容量が数分の1で済む

② 並列補償の特徴：

- ・ 補償範囲（補償対象）は系統上位，下位双方
- ・ 下位側負荷に起因した電圧変動および不平衡，動揺の補償に適し、上位側による変動補償は装置容量が過大となる
- ・ 装置容量は負荷の無効電力で決まり、直列補償に比べて一般に数倍必要
- ・ 送電線の抵抗による電圧降下の補償は困難
- ・ 下位側負荷の無効電力補償を行うとき、電源力率が改善され、また送電損失低減効果が期待できる

以上より、直列補償部と並列補償部は、それぞれ次の様に基本機能を分担させることで、相互に干渉せず有効な補償動作が得られると考える。

並列部： 系統下位側負荷の取る無効電力を補償し、これにより系統上位側，下位側双方の電圧変動補償を行う。

直列部： 系統下位側に対する電圧補償を行う。並列部の補償により系統下位側負荷による電圧変動が補償されている場合には、系統上位側による電圧変動および送電線抵抗分による電圧降下の補償が行われる。

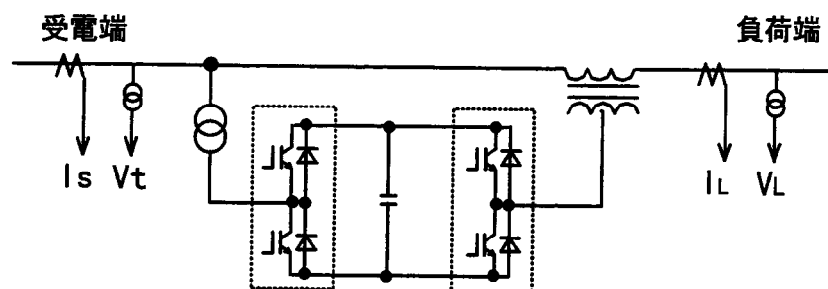


図 6. 3 直並列形補償器の構成と制御検出点

本装置の具体的な補償動作は次の通りとなる。

直列部の動作： 系統下位側電圧の瞬時値指令値と検出値 V_L との差分から補償電圧指令 V_{con} （瞬時値）を求めて瞬時電圧補償を行う。

ここで、瞬時値指令を求める際に、系統電流 I_s を検出し、この値と、あらかじめ設定した線路リアクタンス値とから、送電線路でのリアクタンス降下電圧を求め、この電圧と受電端電圧検出 V_t とから補償電圧の位相を求める様にすれば、位相補償も行いうことが出来る。

並列部の動作： 負荷電流 I_L から正相無効電流成分および逆相電流成分検出し、これを出指令として系統に補償電流を注入する。また、直列部、並列部双方の運転損失を供給する電源動作と共に、直列部が補償動作することで、系統との間で有効電力の授受が発生するとき、その電力の供給、回生を行うコンバータとしても機能する。

以上、直列部、並列部それぞれの動作により、表 6. 1 に示す補償が可能となる。

このことを図によって示すと図 6. 4 となる。この場合、機能を分かり易くするため直列部と並列部の位置関係が系統／負荷に対して前記図 6. 2 と逆になっているが、次項で述べる通りどちらも等価な補償動作を行うものであり本質的な差異は無い。

表 6. 1 直並列形補償器の電圧補償機能

補償対象	並列部	直列部
負荷側無効電力，逆相電力による電圧変動，不平衡	負荷端／受電端電圧とも補償	並列補償容量が不足したときに負荷端電圧を補償
負荷側有効電力による位相変動	—	負荷端電圧位相補償
送電線路R分による電圧変動	—	負荷端電圧補償
上位系統での電圧変動，不平衡	—	負荷端電圧補償

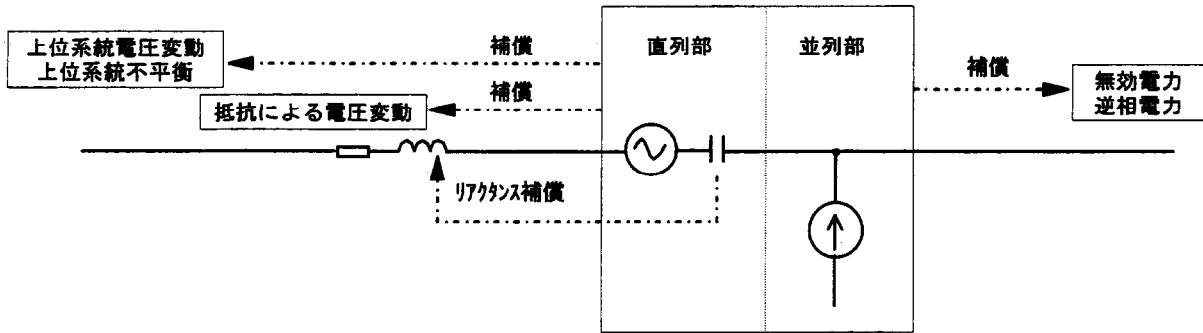


図 6. 4 直並列形補償器の補償機能

本図から分かるように、下位側負荷の取る無効電力や逆相電力に起因した電圧変動や不平衡の電圧障害は並列部で補償され、上位側による電圧障害は直列部で補償される。このため、送配電系統の中間点に本装置を設置することで上位側あるいは下位側による電圧障害をこの設置点でブロックし、その障害の波及を阻止する効果が得られるものと考えられる。

6. 3 装置容量

本装置では、基本的に直列部と並列部それぞれの装置容量は次の通りとなる。

・直列部の装置容量：

上位側負荷による電圧変動幅及び、下位側負荷の有効電流が送電線路のインピーダンスを通過するときの電圧降下幅の合成電圧値と負荷電流の積から決まる容量

・並列部の装置容量：

下位側負荷の取る無効電力、逆相電力の合成容量

ここで、直列部と並列部の位置関係での所要運転容量について検討する。

図 6. 5 は直列部、並列部の位置関係と電力の流れを示すものであり、(a) は直列部に対して、電源側に並列部を設け、(b) は負荷側に並列部を持ってきた場合の電力フローを表している。負荷は、負荷電圧 V_L に対して、いずれも P_L , Q_L で表される有効、無効電力を取っている。ここで、並列部はそれ自身の接続点から負荷側へ流れる無効電力を 100% 補償するものとする。また、直列部は簡単のため、位相補償は行わず、電源側電圧 V_s に対して負荷側の電圧を同位相で V_L とするように補償する。この補償電圧は補償率 k を用いて $k \cdot V_t$ で表される。

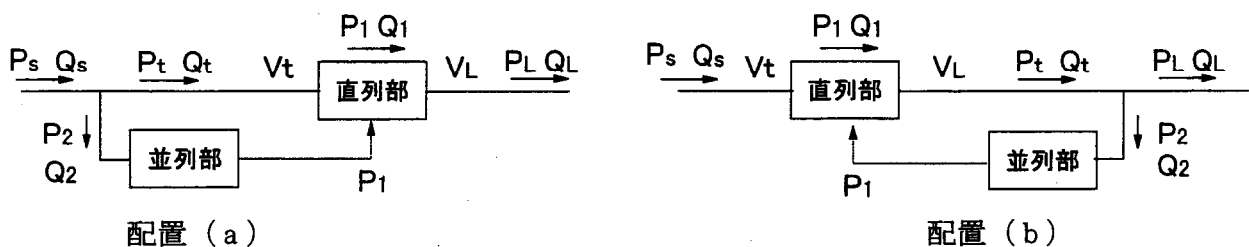


図 6. 5 直列部と並列部の配置と電力フロー

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

この条件で、まず配置 (a) においては電力フローの関係式は次の通りとなる。

直列部自身の出力有効電力 P_1 と無効電力 Q_1 は、直列部の補償電圧が kV_t であることから

$$P_1 = k P_L \quad Q_1 = k Q_L \quad (6.1)$$

電源側から直列部へ流入する有効電力 P_t 、無効電力 Q_t は

$$P_t = P_L - P_1 = (1-k)P_L \quad Q_t = Q_L - Q_1 = (1-k)Q_L \quad (6.2)$$

並列部の取る有効電力 P_2 と無効電力 Q_2 は

$$P_2 = P_1 = k P_L \quad Q_2 = -Q_t = -(1-k)Q_L \quad (6.3)$$

このとき電源側の有効電力 P_s と無効電力 Q_s は次の通りとなる。

$$P_s = P_t + P_2 = P_L \quad Q_s = Q_t + Q_2 = 0 \quad (6.4)$$

以上より負荷の皮相電力を 1pu とすると配置 (a) における直列部と並列部の運転容量 S_s , S_p はそれぞれ以下となる。

$$S_s = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = k \quad S_p = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{(kP_L)^2 + (1-k)^2 Q_L^2} \quad (6.5)$$

同様に、配置 (b) における直列部、並列部の運転容量を求める。

並列部の取る有効電力 P_2 と無効電力 Q_2

$$P_2 = P_1 \quad Q_2 = -Q_L \quad (6.6)$$

直列部から流出する有効電力 P_t 、無効電力 Q_t

$$P_t = P_L + P_1 \quad Q_t = Q_L + Q_1 = 0 \quad (6.7)$$

直列部自身の出力有効電力 P_1 と無効電力 Q_1

$$P_1 = k P_t = k(P_L + P_1) \quad Q_1 = k Q_t = 0 \quad (6.8)$$

以上より配置 (b) における直列部と並列部の運転容量 S_s , S_p はそれぞれ以下となる。

$$S_s = \left| \frac{k}{1-k} P_L \right| \quad S_p = \sqrt{\left(\frac{k}{1-k} P_L \right)^2 + Q_L^2} \quad (6.9)$$

求めた式(6.5), (6.6)より、上位側の負荷による電圧変動が 10%と仮定し、直列部の補償率 k を $k=0.1$ とした場合について、負荷力率に対する直列部、並列部の合成容量(単純加算)の関係を求めると図 6.6の通りとなる。

本図から分かるように、この場合は配置 (a) の方が運転容量は小さくなる。これは、補償器受電点である系統側電圧が降下し、これを直列部でステップアップ(昇圧)をする動作条件を前提にしているためであり、この場合には、並列部が系統電圧につながるため容量が小さくて済むことによるものである。従って、降圧動作が必要な場合には、前述の式の k を負にすることになり、配置 (b) の方が合成容量は小さくなる。

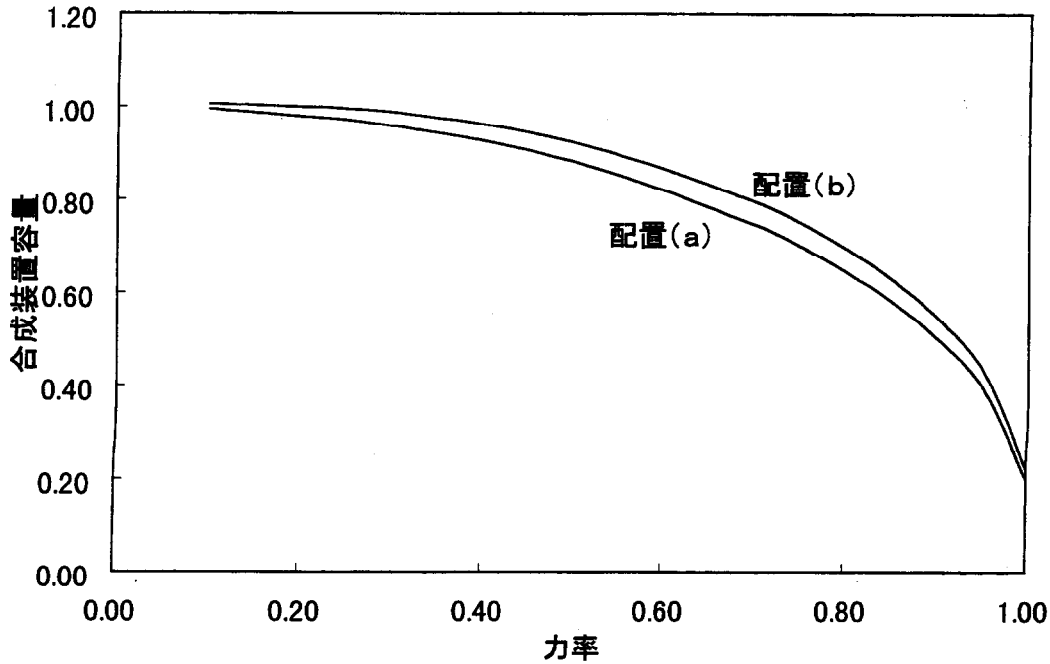


図 6. 6 力率に対する直並列形補償器の装置容量

以上の通り、合成容量を小さくするための直列部と並列部の位置関係は、補償条件に依存するため、いずれが上位／下位であるべきかは、一概に言えない。

本論では、次の理由で配置（a）のほうが直列部と並列部のそれぞれの補償動作の相互干渉が比較的少なく、安定な動作が得易いと考えられるため、この配置を標準に検討を進める。

理由：

系統電圧の制御能力としては、直列部の方が並列部に比べて大きい。これは直列部が直接電圧を系統に足し込む形で補償するのに対して、並列部は無効電力の注入により間接的に電圧補償を行うためである。

配置（b）は、図 6. 7に示すように、電圧と位相を直接的に制御出来る直列部の出力点に、並列部がつながる。そしてこの並列部から、直列部はその運転に必要な電力を受ける。従って、直列部と並列部の相互干渉が大きくなる傾向にある。

一方、配置（a）では並列部は、直列部が直接電圧制御しない点に接続されているため、相互干渉が少ないと考えられる。

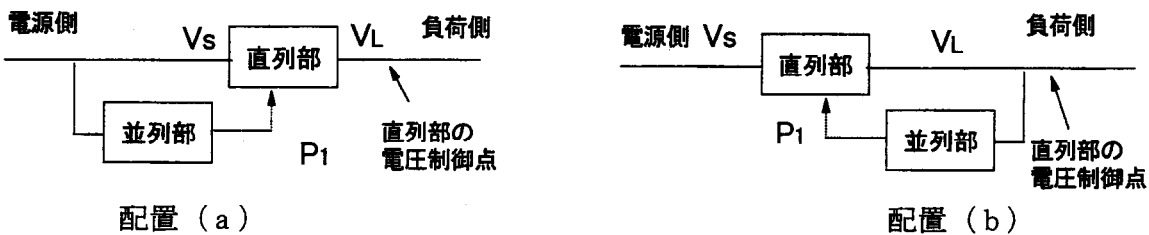


図 6. 7 直列部と並列部の配置と電圧制御の関係

6. 4 制御

図 6. 8に制御ブロック図を示す。本図中 PART.A は並列部の制御ブロックであり、PART.Bは直列部の制御ブロックである。

PART.A では負荷電圧 V_L を基準に、負荷電流検出 I_L から有効電流を除いた無効電流と逆相電流を抽出する。そして、これを出力電流指令として、系統に無効電流と逆相電流を注入し、負荷の取る無効電力と逆相電力を相殺するよう動作する。これにより、補償装置設置点下位側負荷に起因する電圧変動や、不平衡を系統全体に対して補償する。

一方 PART.B では、負荷端電圧目標値 V_L^* (瞬時値) と受電端電圧 V_t との差から、補償すべき瞬時電圧指令値を求めて負荷端電圧の補償を行う。ここで、負荷端電圧目標値は、系統電流 I_s を検出し、これが系統インピーダンス X を流れることにより降下する電圧を演算し、受電端電圧 V_t の検出にこれを加えることで目標位相を演算する。そしてこの位相と目標振幅 $|V_L|$ とから、負荷電圧目標値 V_L^* (瞬時値) を求める。これにより、系統上位側に起因した電圧変動や不平衡及び、送電線の抵抗分に起因した電圧変動を、装置設置点下位側に対して補償すると共に、送電線のリアクタンス成分による系統電圧の位相変動までを補償する。

以上により、補償装置設置点の下位側 (負荷側) , 上位側 (系統側) 双方で発生する電圧変動と不平衡を本装置で一括して補償することができることになる。

なお、PART.A の並列部の制御では上記の補償動作とに加え、直流中間電圧 E_{dc} 一定制御を行う。ここで、直列部の有効電力の入出力により直流中間電圧が大きく変動することが懸念される場合、直列部の入出力電力 P_s をあらかじめ検出し、この電力から並列部の有効電流指令を求めてフィードフォワード指令として与える構成とすれば良い。これにより、直流中間コンデンサのエネルギー流入、流出が最小限に抑制され、直流電圧変動が抑制されると共に、コンデンサ容量を極小化することが可能となる。図 6. 8中の①で示した箇所は、この場合の構成を示すものである。

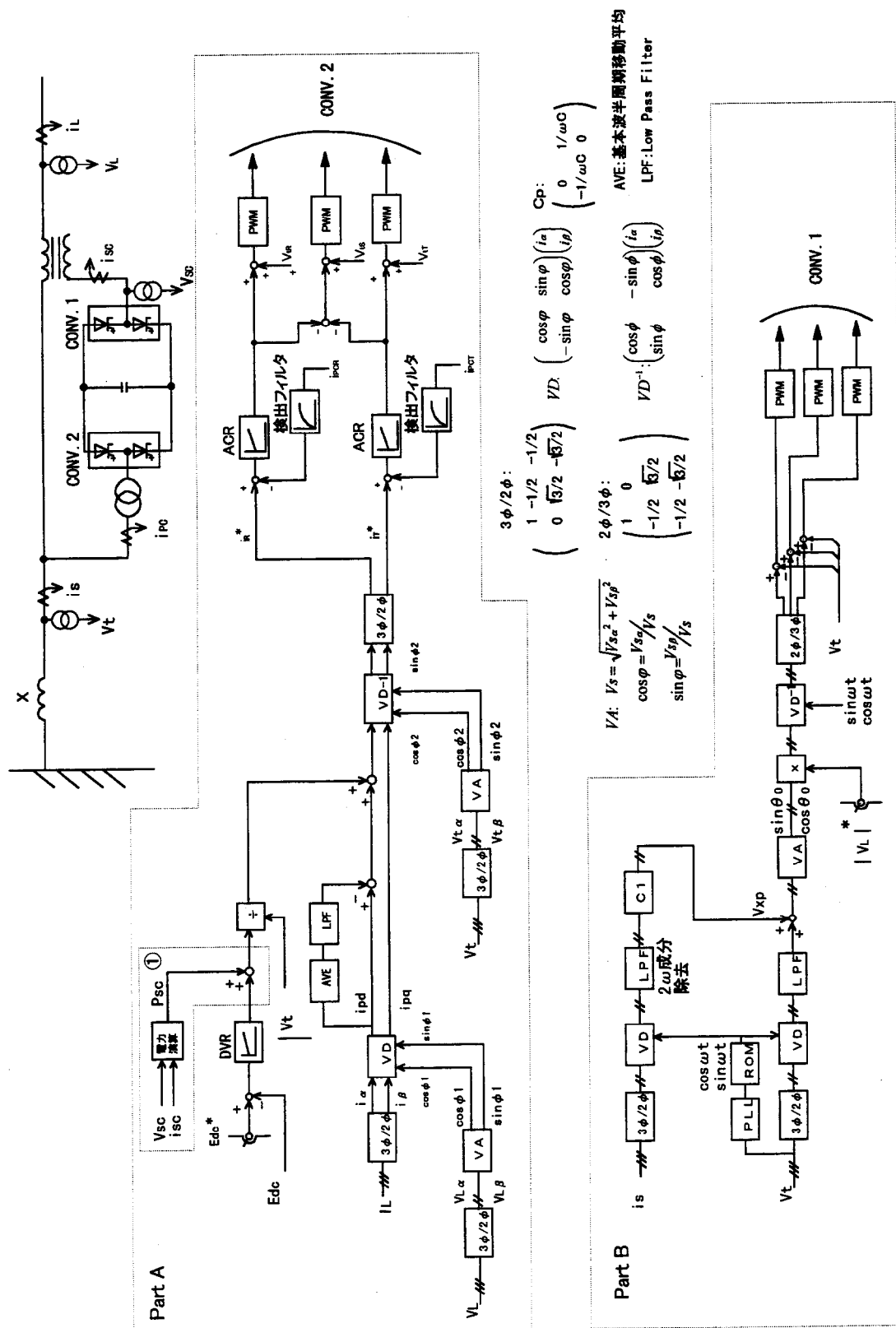


図 6.8 直並列形補償器の制御構成

6.5 シミュレーション

以上に示した直並列形補償装置の性能を、まずシミュレーションにより検証・評価した。

6.5.1 シミュレーションモデル

図 6.9 にシミュレーションモデルを示す。系統インピーダンスは25%とし、負荷は補償特性が明確になるように負荷力率 0.1 の L-R 負荷とした。インバータは、直列補償部、並列補償部とも、3 相 PWM インバータとし、PWM 周波数は 2.25kHz した。

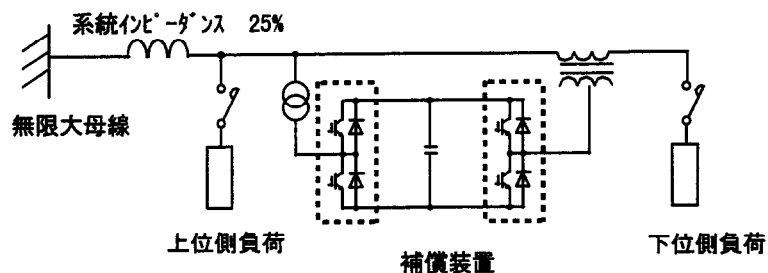


図 6.9 シミュレーションモデル

6.5.2 電圧変動補償特性

図 6.10 は直並列補償器に対して下位側（負荷側）負荷による電圧変動の補償特性を示している。(a) (b) はそれぞれ、負荷端電圧と受電端電圧の補償特性である。また図 6.11 は同様に系統上位側負荷による電圧変動の補償特性である。

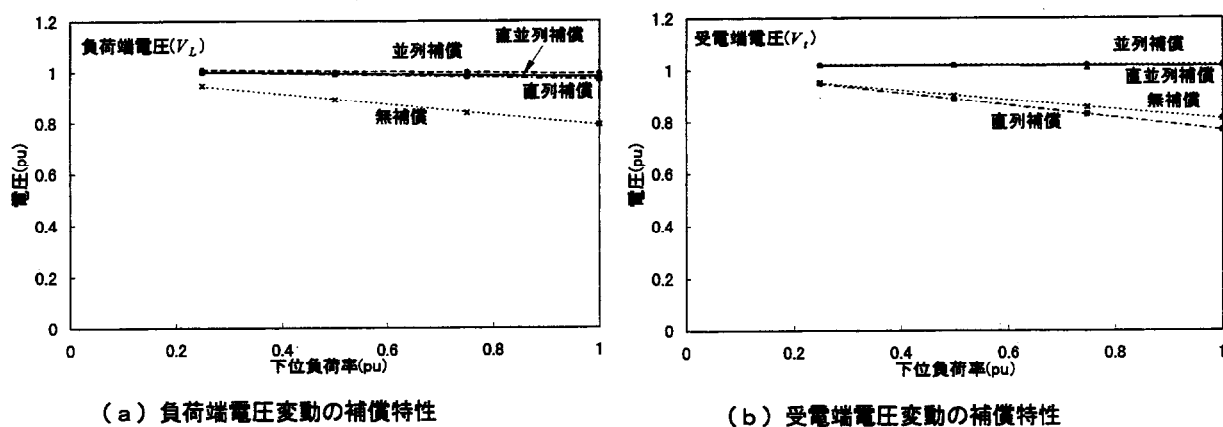


図 6.10 下位側負荷による電圧変動補償特性

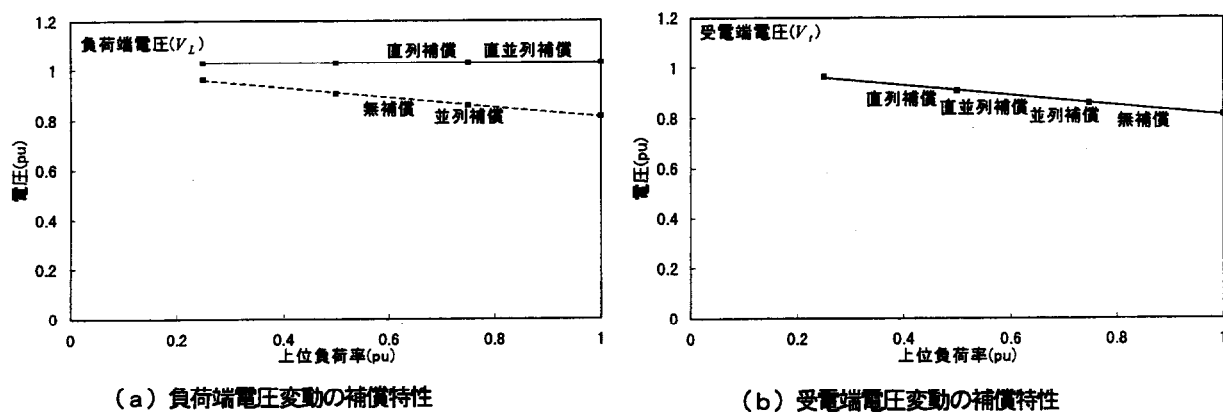


図 6.11 上位側負荷による電圧変動補償特性解析結果

これらの解析においては、対象とする直並列補償器の補償特性を明確にするために、この補償特性と共に、無補償時の電圧特性および直列形補償器、並列形補償器の電圧補償特性の解析結果も同時に取得し、併記している。これら図 6. 10, 図 6. 11 より、上位側負荷による受電端電圧変動は補償しないが、これ以外については全て直並列形補償装置により電圧一定に補償できていることが分かる。

6. 5. 3 三相不平衡電圧補償特性

図 6. 12 は直並列補償器による、三相不平衡電圧補償特性を示している。本図中 (a) は下位側負荷, (b) は上位側負荷による不平衡電圧補償特性である。これらから系統上位, 下位の不平衡負荷に対して、ほぼ所期の不平衡補償特性の得られていることが分かる。

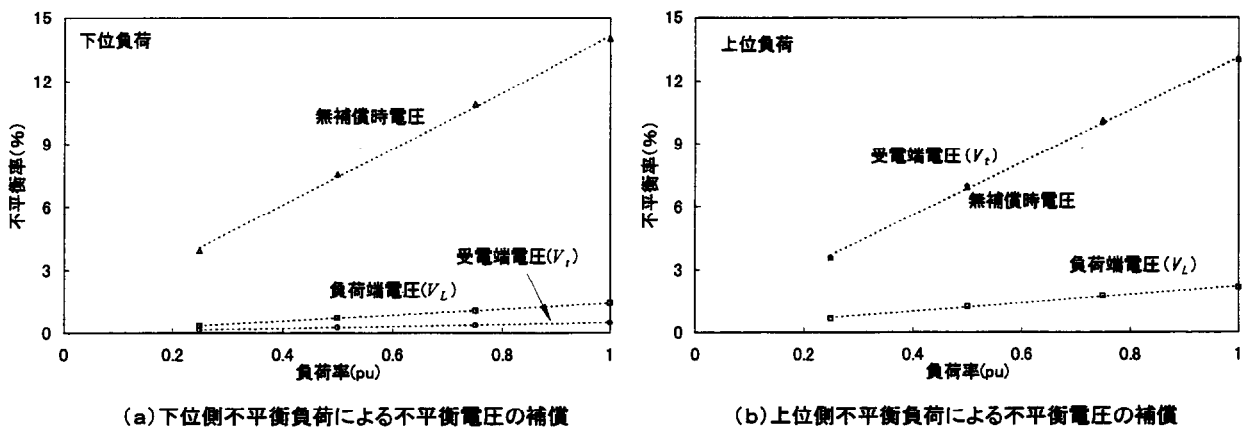


図 6. 12 三相不平衡電圧補償特性解析結果

6. 5. 4 過渡特性

図 6. 13 は、下位側負荷と上位側負荷がそれぞれ投入された時の電圧補償過渡応答特性を示している。これより1サイクル程度で負荷端/受電端電圧ともに所期の電圧補償が行えていることが分かる。

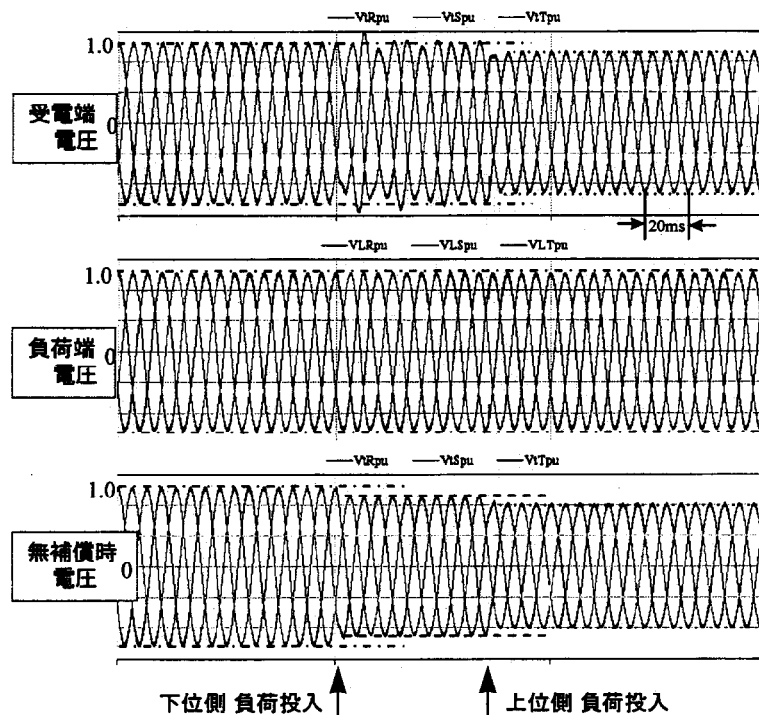


図 6. 1 3 過渡応答特性解析結果

6. 6 実験

以上に示した直並列形補償器の性能を実験により検証・評価した。以下にこの実験装置の概要と実験結果を示す。

6. 6. 1 実験装置

実験装置の構成は図 6. 1 4に示す通りである。

本装置では、系統及び負荷（誘導性負荷）の容量を16kVAとし、直列部は4kVA（系統容量の25%）、並列部は6.4kVA（系統容量の40%）の補償容量としている。ここで直列部は2多重のIGBTインバータと多重トランス及び高調波フィルタ、直列トランスから構成される。また、並列部は、4多重のIGBTインバータとこれを直列多重接続する多重変圧器及び高調波フィルタで構成されている。各変換器のスイッチング周波数は、大容量の実用器を想定し、通常のIGBTインバータとしては低い周波数（直列部1350Hz、並列部750Hz）で駆動している。表 6. 2に実験装置の仕様を示す。

本装置により、直並列補償装置の静特性及び動特性の性能評価試験を行った。

表 6. 2 直並列形補償器の実験装置仕様

部位	項目	仕 様
直列形補償部	容量	4 k V A
	補償電圧	2 5 %MAX
	素子	I G B T （6MB120L-060）
	変換器構成	単相×3相×2多重
	電圧制御	正弦波／三角波PWM
	スイッチング周波数	1 3 5 0 H z
並列形補償部	容量	6. 4 k V A
	素子	I G B T （6MB120L-060）
	変換機構成	単相×3相×4多重
	電圧制御	正弦波／三角波PWM
	スイッチング周波数	7 5 0 H z

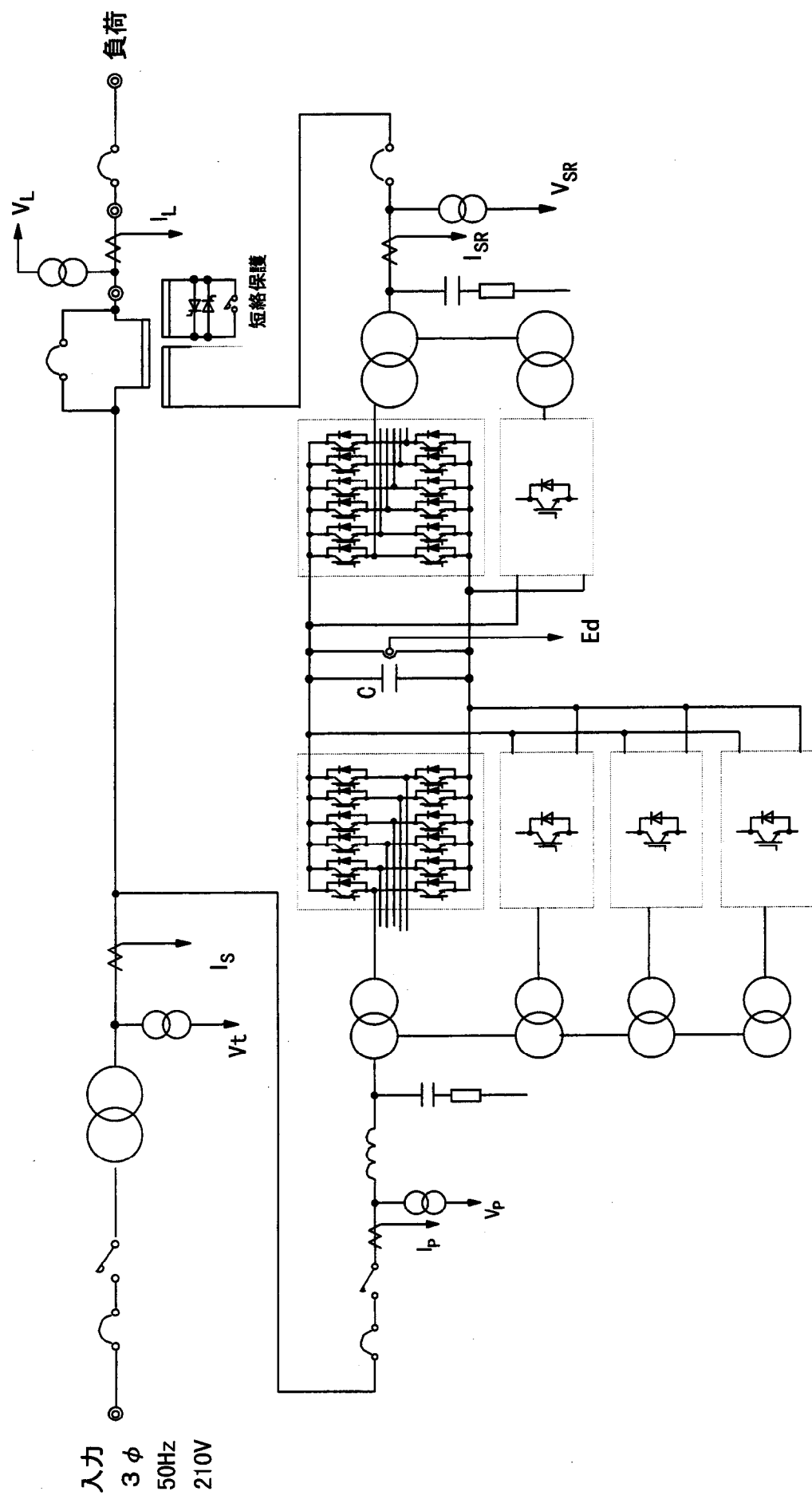


図 6.14 実験装置の構成

6. 6. 2 実験結果

(1) 静特性試験結果1 (下位側負荷による変動補償)

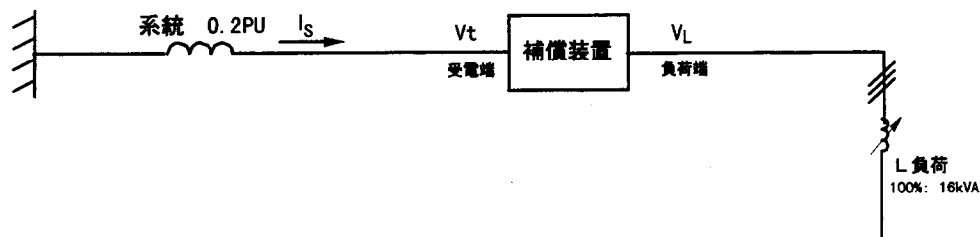


図 6. 1 5 実験回路構成 (下位側三相誘導性負荷)

図 6. 1 5 に示すように、系統下位側に三相リアクトル負荷を接続した場合の電圧変動補償特性を測定した。図 6. 1 6 はこの補償動作時の各部波形であり、図 6. 1 7 は補償特性結果を示している。

無補償時に負荷端電圧は、負荷率の増加に従って低下し、定格負荷 (16 kVA) で約 80 % (20 % 低下) の電圧となっている。これに対して、直並列形補償装置で補償することにより、負荷端電圧はほぼ一定に維持できることが分かる。

また、受電端電圧は、負荷率約 40 % までは負荷端電圧と同様に一定に維持されるが、これ以上の負荷に対しては、無補償時と同様の比率で電圧が降下している。これは、並列補償の容量が 6.4 kVA (負荷に対して 40 %) であるため、これ以下の負荷に対しては並列補償部が機能して負荷端電圧と共に受電端電圧を補償できる。しかし、これを越えると直列部のみの補償動作となるため、受電端電圧は改善できないことを示している。

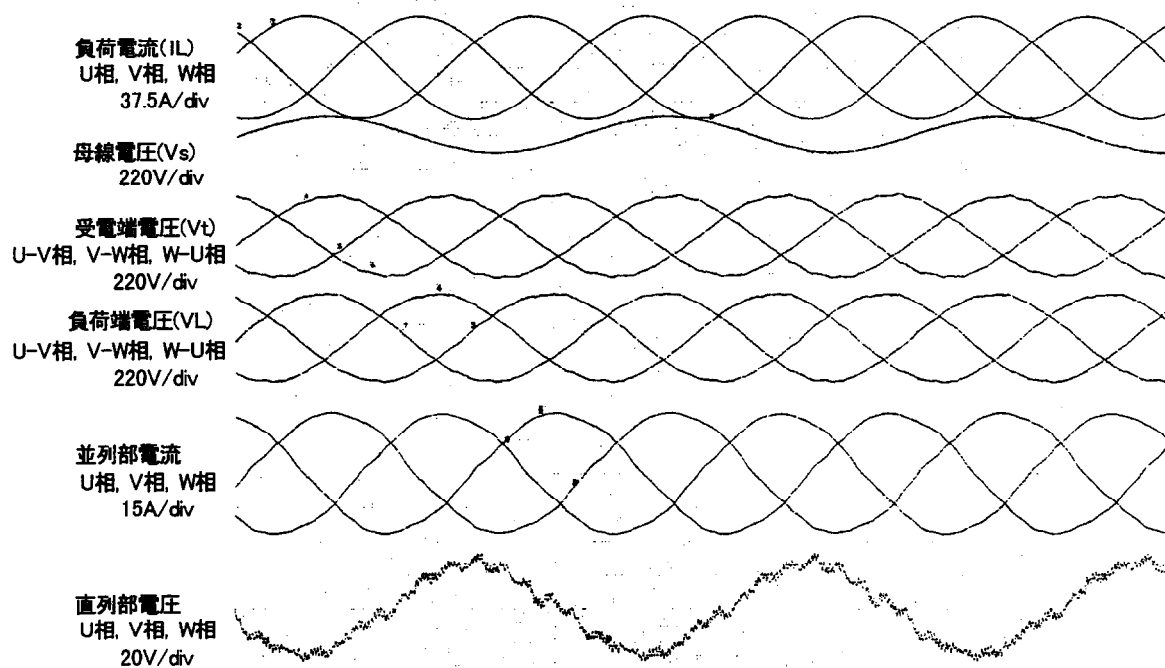


図 6. 1 6 電圧補償動作波形 (下位側三相誘導性負荷)

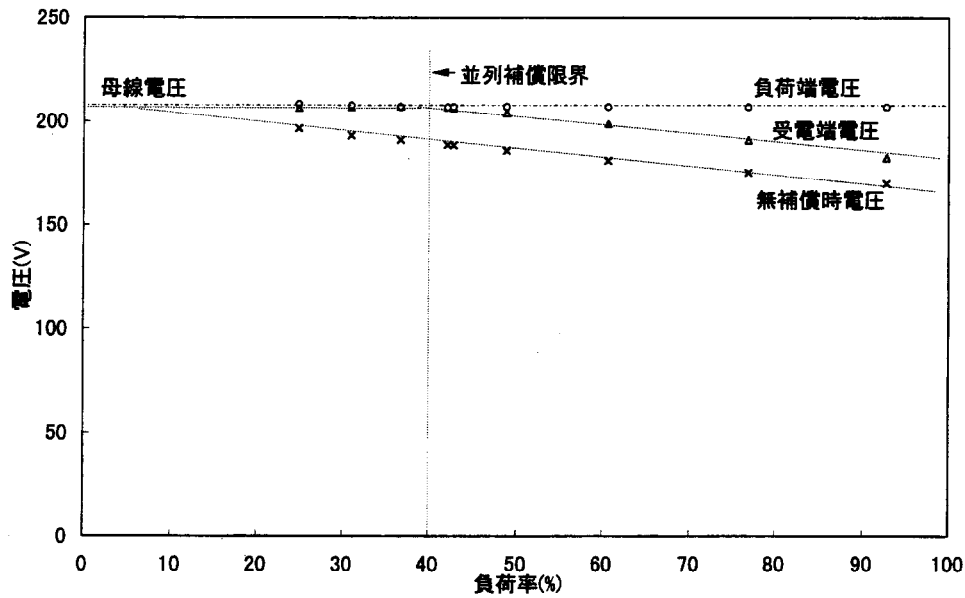


図 6. 1 7 電圧補償特性（下位側三相誘導性負荷）

次に図 6. 1 8 の試験回路で、系統下位側に単相リアクトル負荷を接続して発生する不平衡電圧の補償特性を取得した。この結果を図 6. 1 9 に示す。

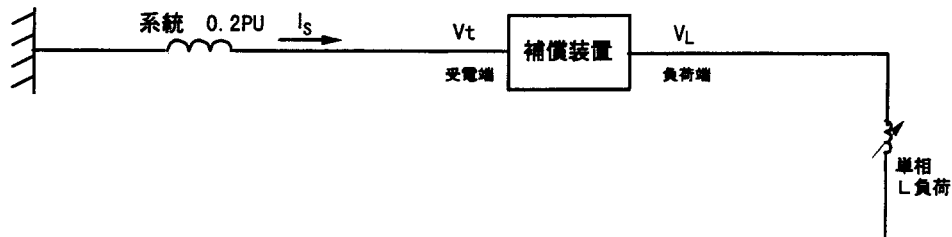


図 6. 1 8 実験回路構成（下位側単相誘導性負荷）

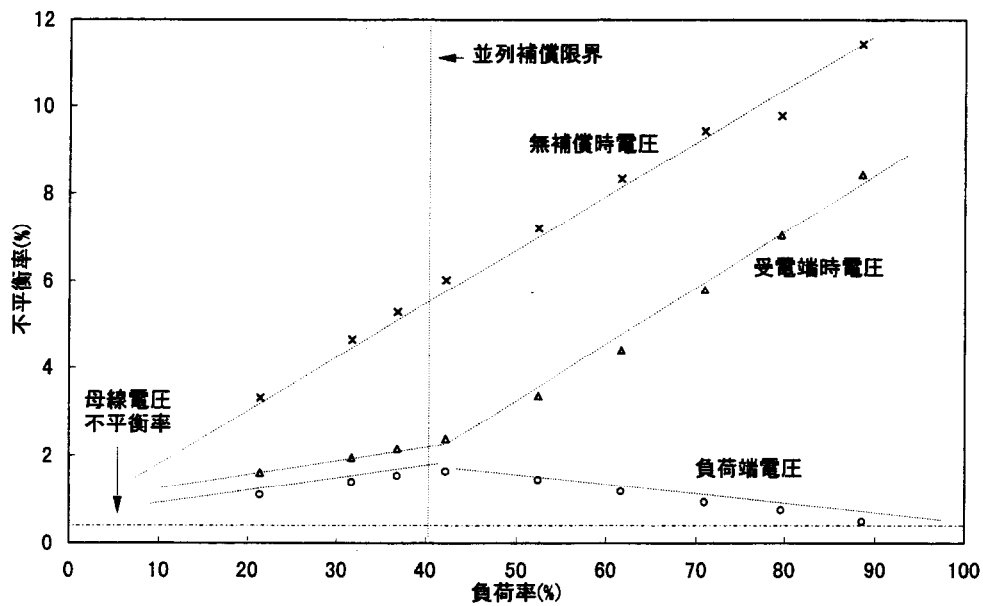


図 6. 1 9 不平衡電圧補償特性（下位側単相誘導性負荷）

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

不平衡（単相）の負荷率の増加に伴い、負荷端電圧は12%以上の不平衡となるのに対し、補償装置により2%以下に改善できている。また、受電端電圧の不平衡は、図6.17と同様に、並列補償限界内で改善されるが、これを越えると改善できないことが分かる。

図6.20はこの補償動作を行ったときの代表波形である。

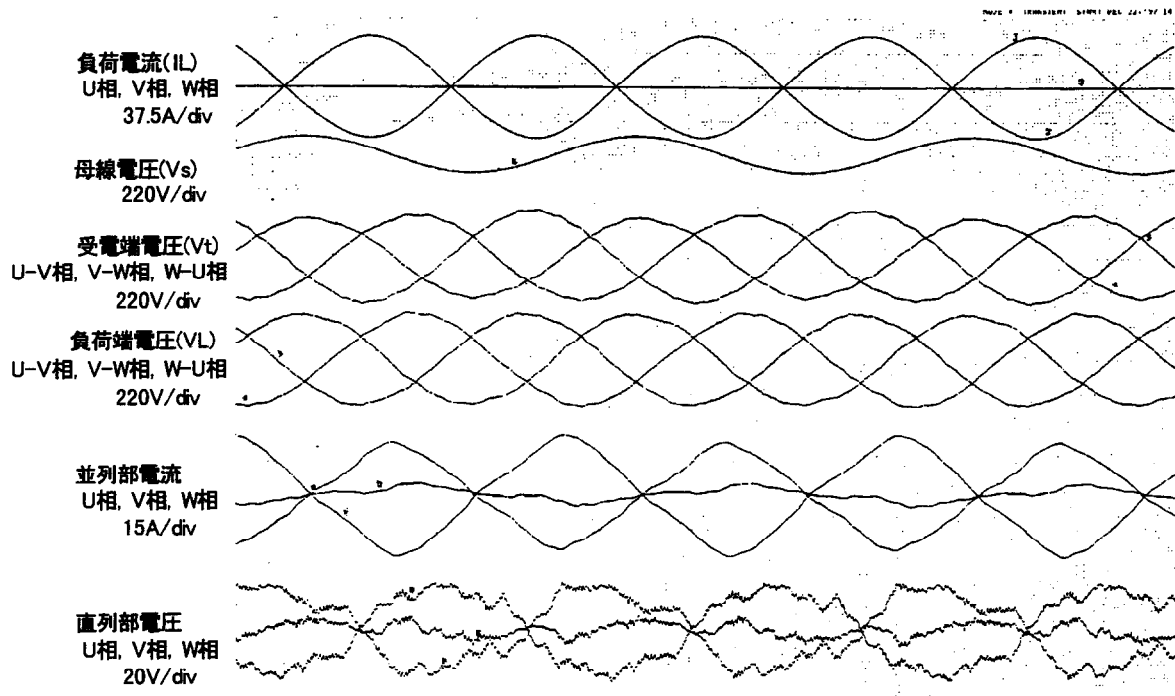


図 6. 20 不平衡電圧補償動作波形（下位側単相誘導性負荷）

図6.21は系統下位側に抵抗負荷（81%：13kVA）が接続された時にの各部の波形を示している。負荷電流が送電線路リアクタンスを通過することにより、受電端電圧が送電端電圧位相に対して遅れ位相となるのに対し、補償装置により負荷端電圧位相は送電端電圧位相とほぼ同相に補償されていることが分かる。

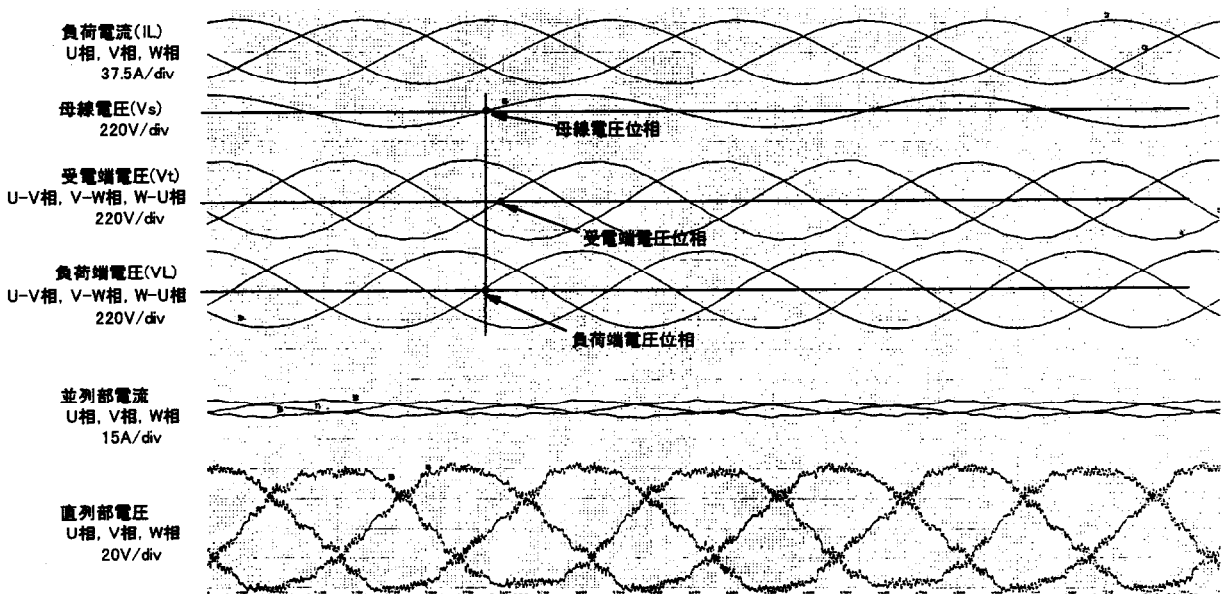


図 6. 21 抵抗負荷による位相変動補償波形（下位側三相抵抗負荷）

(2) 電圧補償静特性2 (上位側による電圧変動)

図 6. 2 2 の回路構成で、系統上位側負荷による電圧変動の補償特性を取得した。この試験は系統上位側の負荷による電圧変動補償特性を取得するものであるが、系統下位側にもベース負荷として25% (4 kVA) のリアクトルが接続されている。図 6. 2 3 にこの結果を示す。無補償時、上位側負荷率0%でも負荷端電圧は下位側ベース負荷により約10V (5%) 電圧低下し、更に上位側負荷率の増加に伴い、上位側負荷率75%で約40V (20%) 電圧が低下している。これを本装置で補償することにより、全域でほぼ一定の負荷端電圧を得ることができている。また、受電端電圧は、並列部の補償動作により、下位側ベース負荷による電圧低下は補償されるが、上位側負荷による電圧変動は無補償時と同様の比率で電圧が降下している。図 6. 2 4 に系統定格点での補償動作波形を示す。

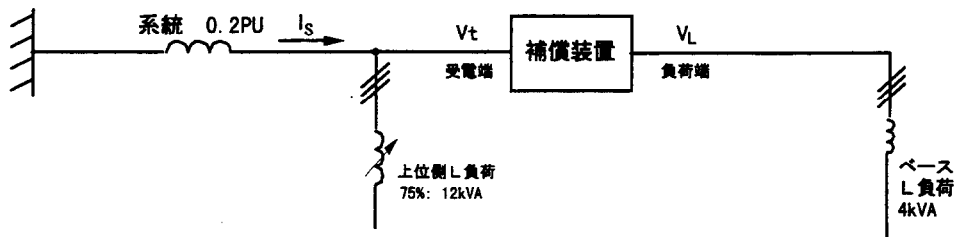


図 6. 2 2 実験回路構成 (上位側三相誘導性負荷)

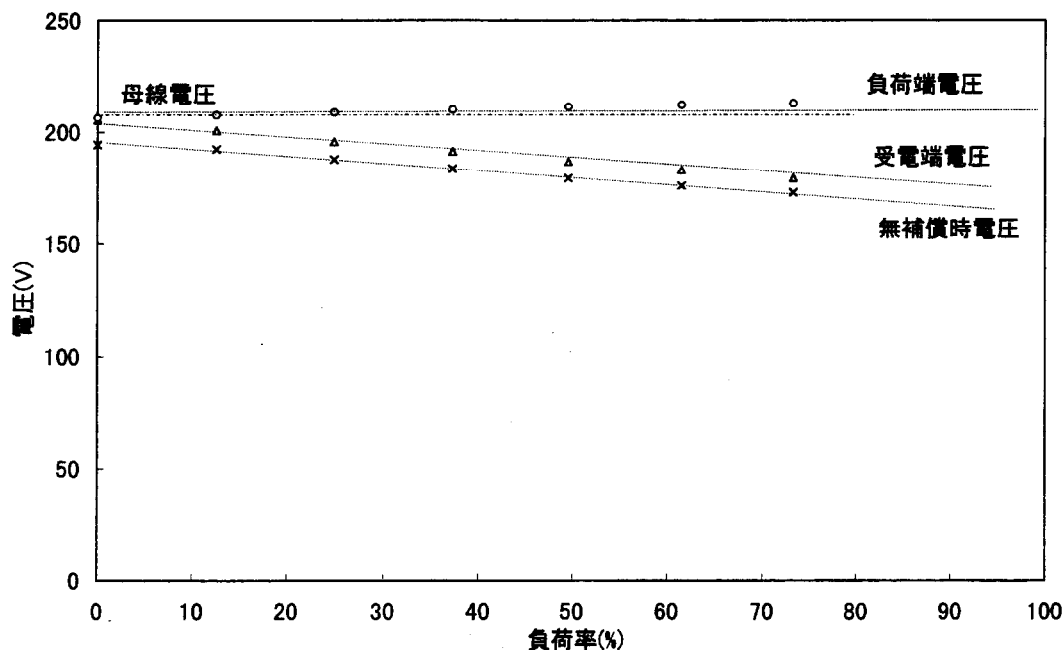


図 6. 2 3 電圧補償特性 (上位側三相誘導性負荷)

図 6. 2 5 と図 6. 2 6 はそれぞれ単相リアクトル負荷による電圧不平衡の試験回路と試験結果を示している。負荷端電圧は、無補償時の電圧不平衡率に対して、補償することで約 $1/3$ に改善できている。ここで、不平衡率が完全に改善できていないのは、制御遅れや波形歪みによる補償誤差によるものである。

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

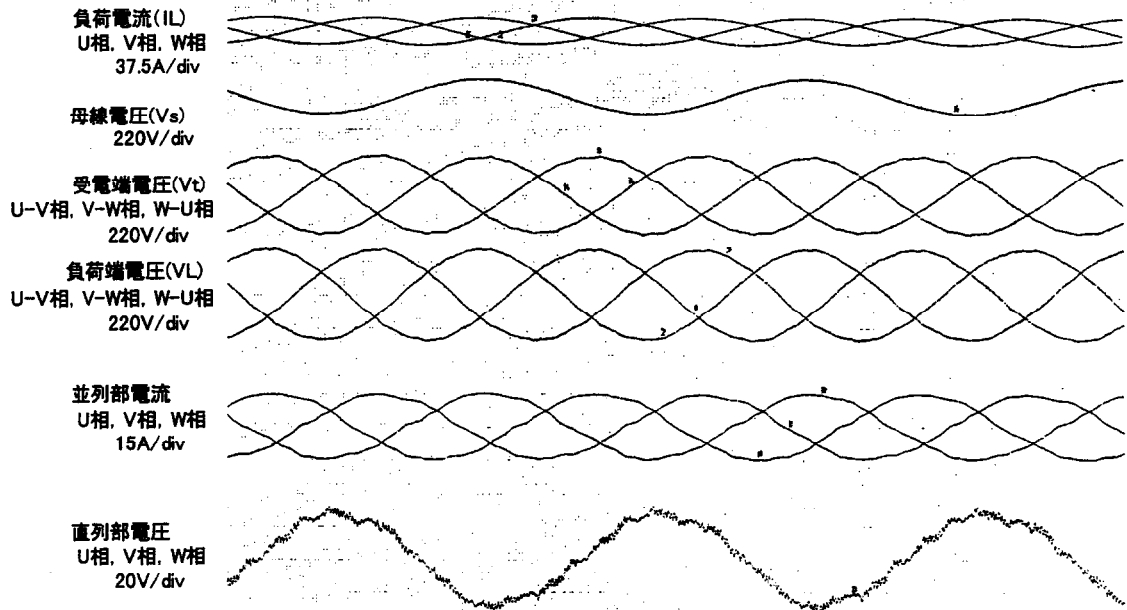


図 6.24 電圧補償動作波形 (上位側三相誘導性負荷)

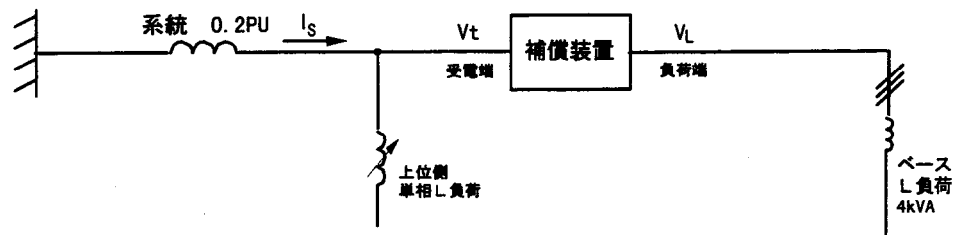


図 6.25 実験回路構成 (上位側単相誘導性負荷)

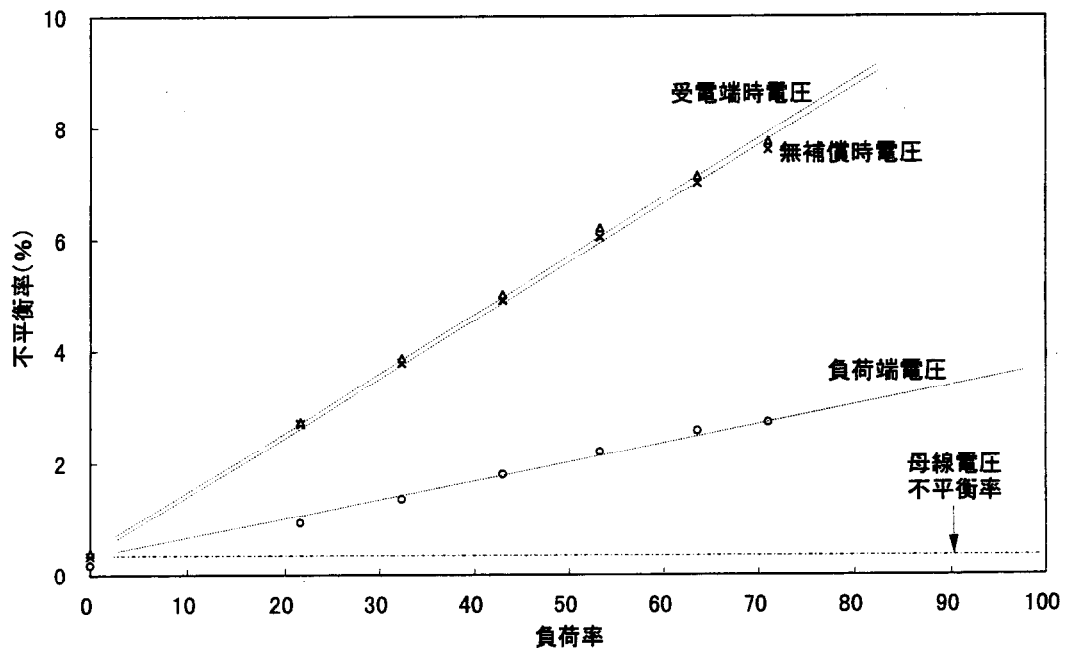


図 6.26 不平衡電圧補償特性 (上位側単相誘導性負荷)

(3) 過渡特性試験

図 6. 27 と図 6. 28 はそれぞれ系統下位側と上位側で三相リアクトル負荷を投入したときの電圧動揺に対する過渡特性を示している。

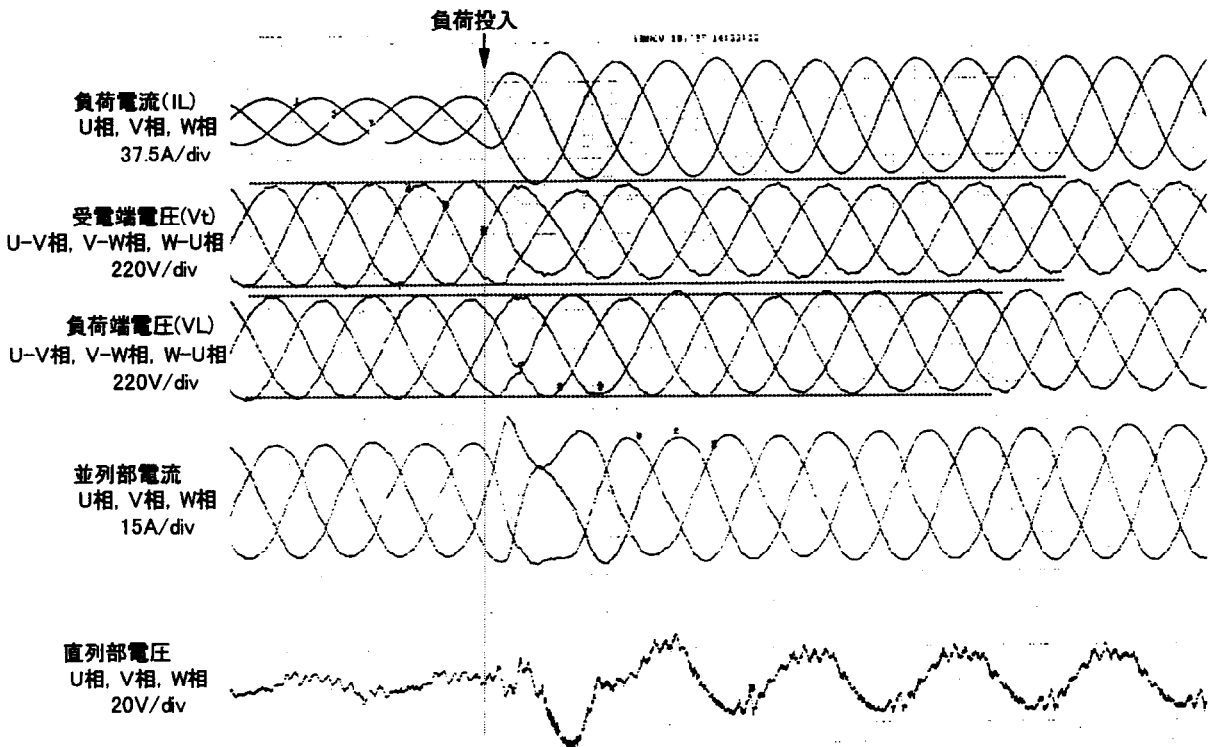


図 6. 27 電圧補償過渡応答 (下位側三相誘導性負荷)

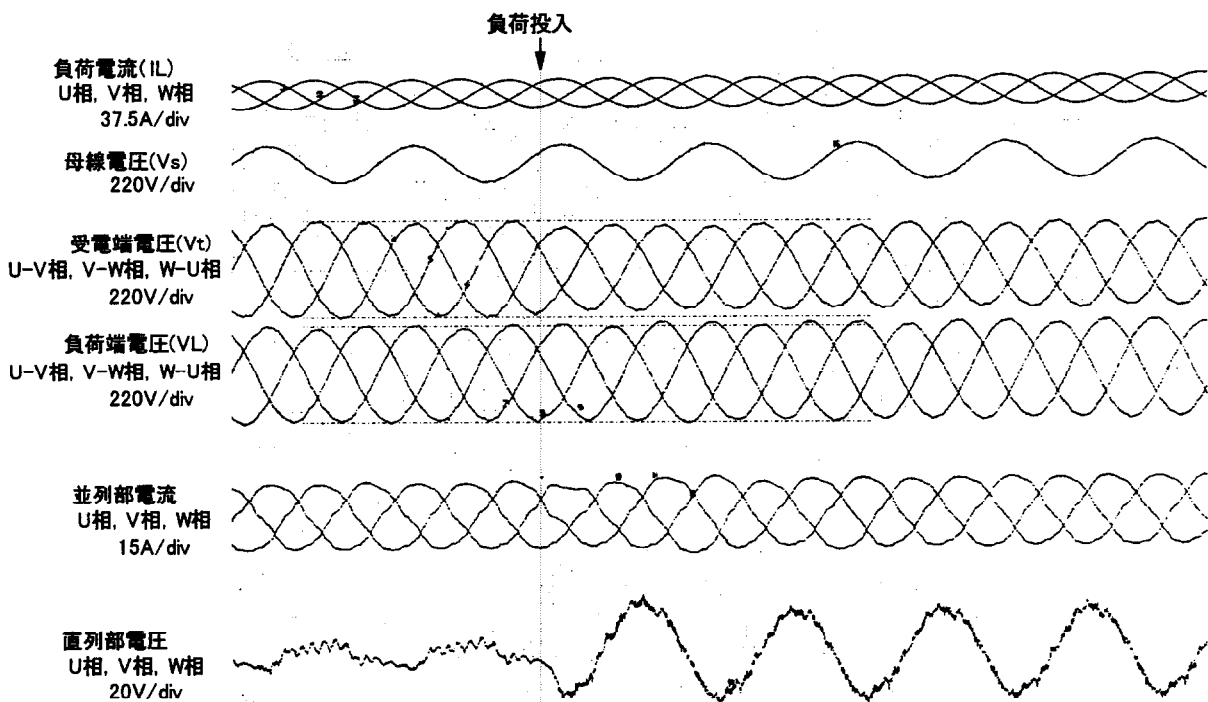


図 6. 28 電圧補償過渡応答 (上位側三相誘導性負荷)

6. 6. 3 考察

(1) 他の補償方式との比較

前項の実験結果で直並列補償器の電圧補償特性を示した。ここで、この補償特性を直列補償器及び並列補償器それぞれの補償特性と比較した結果を示す。

図 6. 29 は下位側に三相誘導性負荷を接続したときの負荷端電圧変動の補償特性を示している。

無補償時には、負荷端電圧は負荷率100% (16 kVA) で約40 V (20%) 電圧低下している。並列補償は6.4 kVA (負荷容量の40%) のため、負荷率40%までは電圧補償できるが、これ以上の領域では無補償と同様の比率で電圧が降下している。一方、直列補償

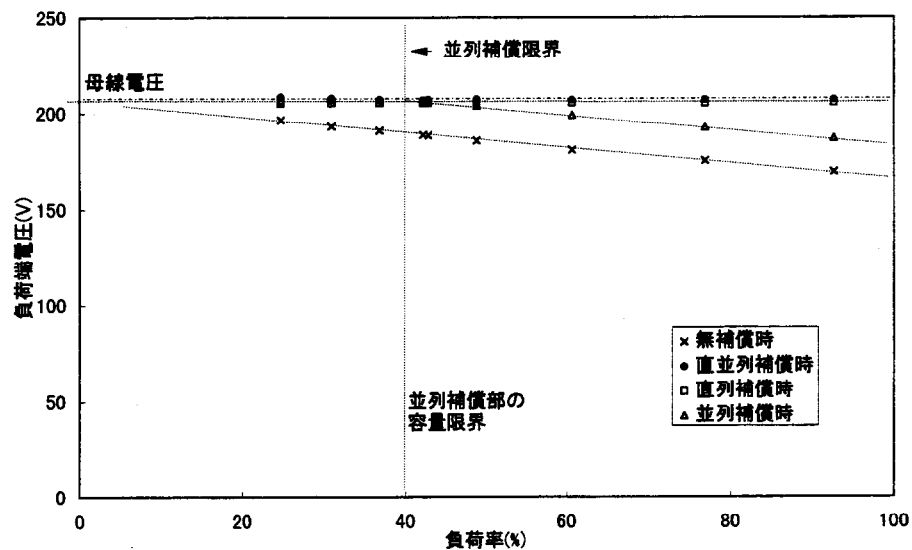


図 6. 29 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較 (下位側誘導性負荷)

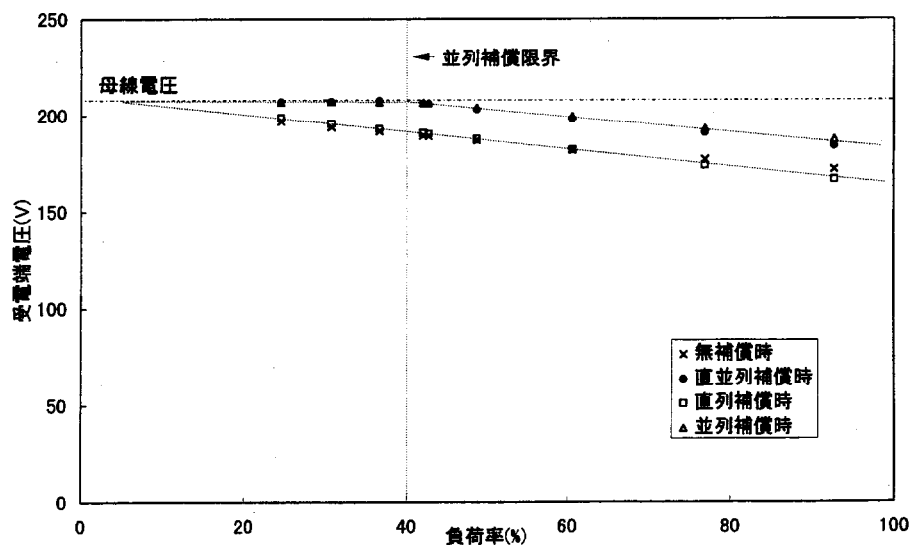


図 6. 30 各補償方式による受電端電圧補償特性の比較 (下位側誘導性負荷)

は4 kVA（負荷容量の25%）であるが、定格負荷点での所要補償容量は3.2 kVA（20%）であり、全域で問題なく電圧補償が行えている。また、本章で取り上げた直並列補償（直列部4 kVA、並列部6.4 kVA）でも同様に問題の無い補償特性を示している。この場合、負荷率40%までは並列部が機能し、これ以上の負荷領域で並列部が容量限界となるため、直列部の働きで電圧が維持されている。

また、図 6.30は同様の条件での受電端電圧を示している。直列補償の場合、負荷端電圧に対しては完全な補償が行えたが、受電端電圧に対しては無補償時とほぼ同様に電圧が降下している。一方、並列補償と直並列補償の場合には、並列補償容量内の領域で電圧補償が行えていることが分かる。

図 6.31と図 6.32は下位側単相負荷による不平衡電圧補償特性の比較である。

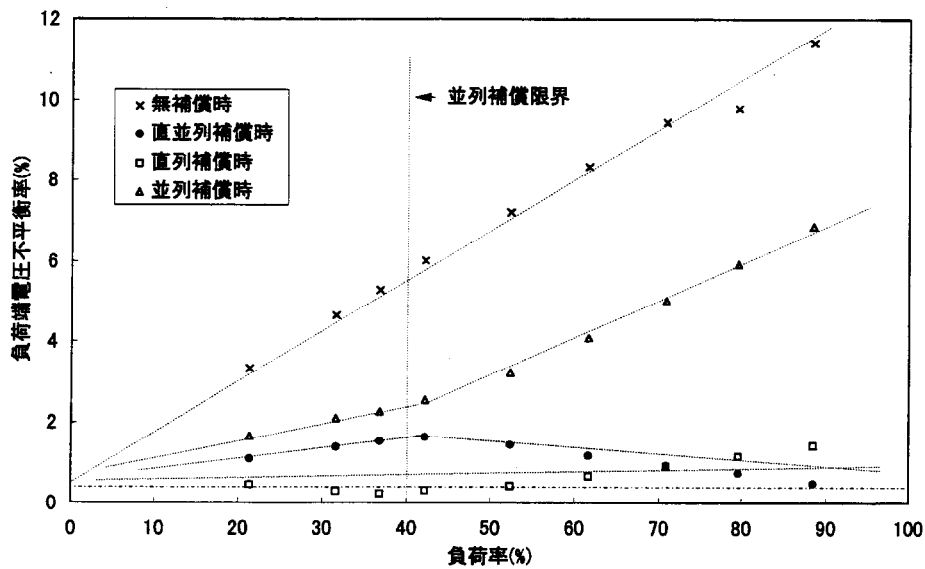


図 6.31 各補償方式による負荷端不平衡電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）

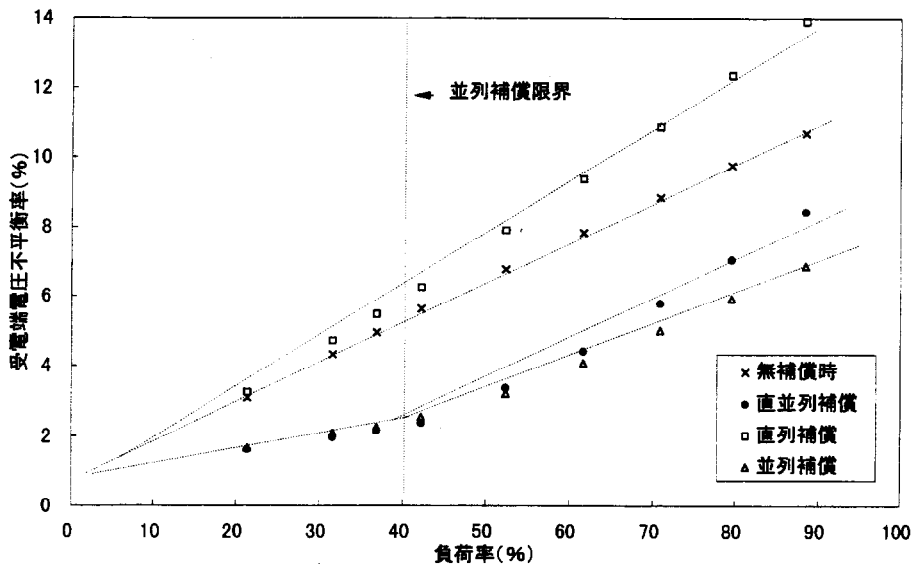


図 6.32 各補償方式による受電端不平衡電圧補償特性の比較（下位側誘導性負荷）

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

これらにおいても図 6. 29, 図 6. 30に示した平衡負荷による電圧補償の場合と同様の傾向で負荷端電圧と受電端電圧の不均衡補償の行われていることが分かる。

以上の結果から、直並列補償は下位側負荷に対して負荷端電圧と受電端電圧の双方に対して補償効果のあることが分かる。

図 6. 33, 図 6. 34は系統上位側負荷による電圧変動と不平衡の補償特性の比較である。この試験においても、負荷率を変化させる上位側負荷と共に、下位側に三相リアクトル (4 kVA : 25%) によるベース負荷が接続されている。

図 6. 33の電圧補償特性において、並列補償では無補償に比べて、下位側のベース負荷による電圧降下のみの補償ができていますが、上位側負荷率変化に対しては全く無補償と同

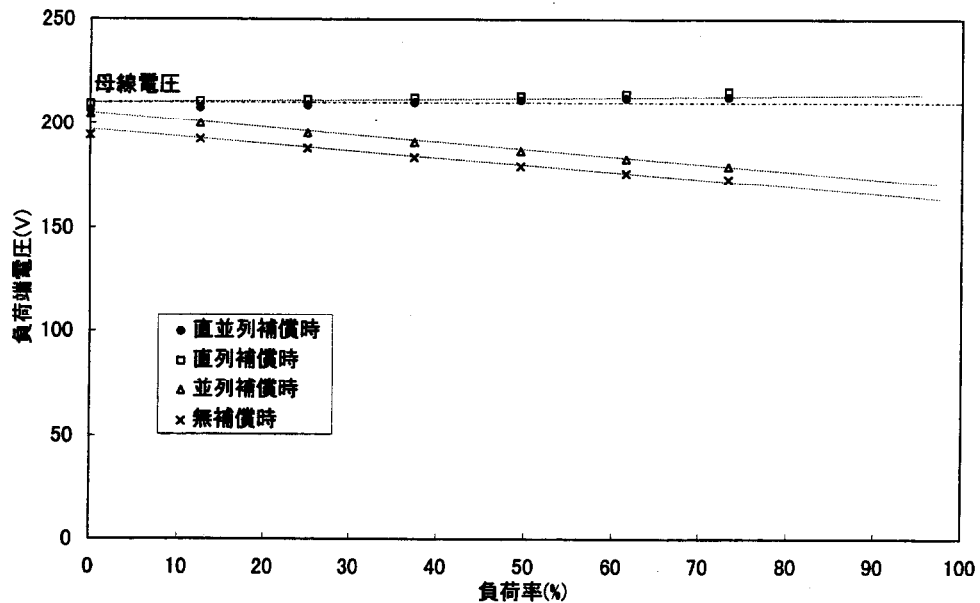


図 6. 33 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較 (上位側誘導性負荷)

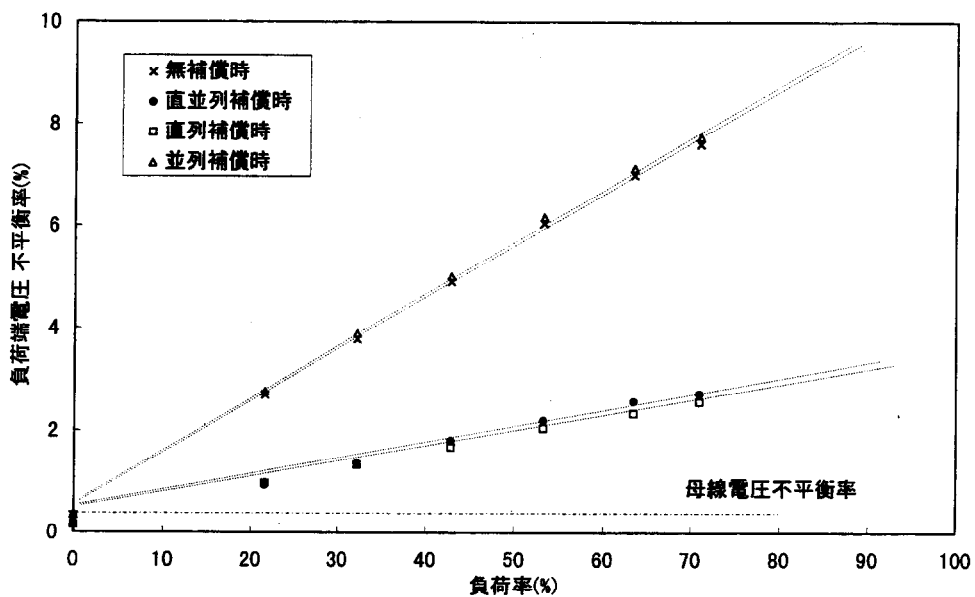


図 6. 34 各補償方式による負荷端不平衡電圧補償特性の比較 (上位側誘導性負荷)

様電圧補償を行っていない。一方、直列補償と直並列補償は、負荷率変化に関わりなく負荷端電圧を一定に補償できている。

また、図 6. 3 4 の不平衡電圧補償でも直列補償と直並列補償のみ補償ができている。

(2) 系統送電線路の抵抗分による電圧変動の補償

図 6. 3 5 は系統インピーダンスとして抵抗分14.5%(0.4Ω)が存在する場合に、抵抗負荷を接続したときに発生する電圧変動の補償特性を示している。並列補償は無効電力補償動作のため、この試験条件では全く補償動作を行わず、無補償時と同様に定格点で約20%(40V)電圧低下が生じている。一方、直列及び直並列補償は所期の補償動作ができており、負荷端電圧は一定に保たれている。

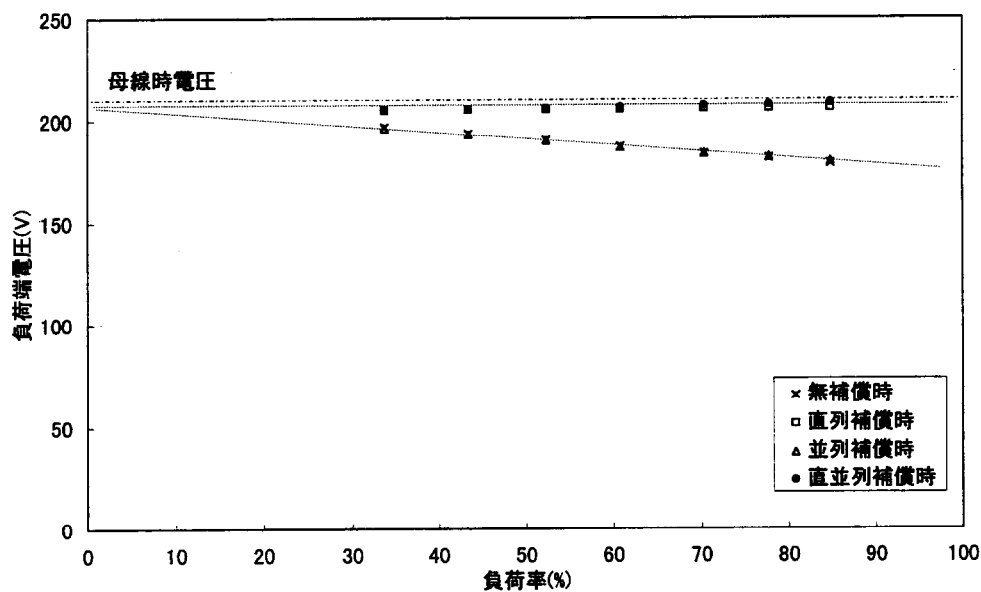


図 6. 3 5 各補償方式による負荷端電圧補償特性の比較
(線路抵抗成分による電圧変動)

6.7 フィージビリティスタディー（配電系統への適用性検討）

本装置を配電系統の電圧補償装置として使用することを想定し、その適用性について検討する。

6.7.1 設置系統条件

比較的長いこう長（10 km）を持つ配電系統の重負荷時（2.5 MVA）に対する電圧補償特性について検討する。以下に検討対象の条件を示す。

（1）系統

定格電圧： 6 6 0 0 V

送出し電圧： 6 9 0 0 V（重負荷時）

電圧変動許容範囲： $\pm 5\%$

こう長： 1 0 k m

（A点：送り出し点 B点：中間点5 km C点：末端）

線種： C u 8 0 m m²

インピーダンス： $r = 0.013 \text{ pu/km}$

$X = 0.023 \text{ pu/km}$ (6.6kV, 2.5MVA) ⁽⁷⁵⁾

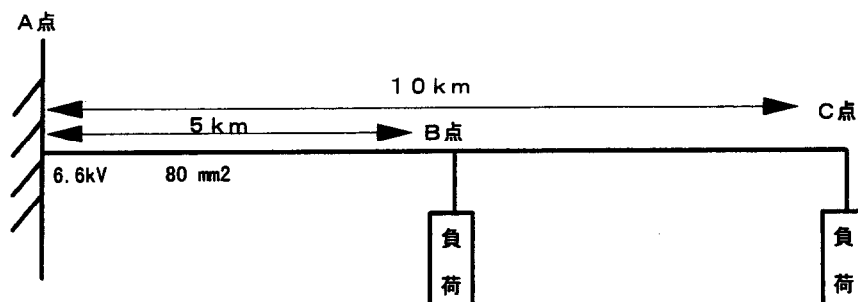


図 6.36 補償対象の配電系統

（2）負荷

負荷は、総容量2.5 MVA、力率0.85とし、解析を簡単化するために電流源負荷特性とする。負荷の接続位置は、中間点（B点）と末端（C点）の2ヶ所に集中しているものとし、総容量一定（1pu）の条件で、それぞれの配分を以下の3ケースとする。

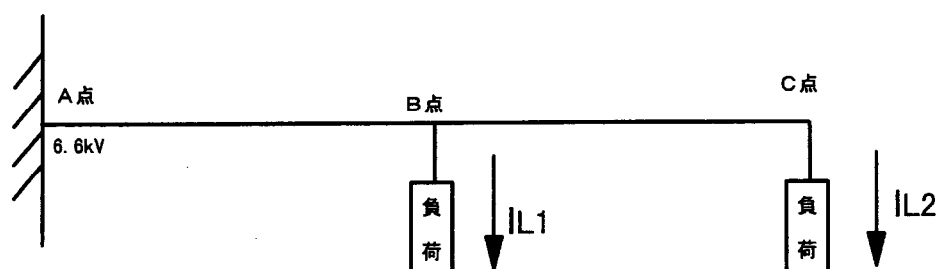


図 6.37 負荷配置

Case1. :	$IL1 = 2/3 \text{ pu}$	$IL2 = 1/3 \text{ pu}$	(6. 10)
Case2. :	$IL1 = 1/2 \text{ pu}$	$IL2 = 1/2 \text{ pu}$	(6. 11)
Case3. :	$IL1 = 1/3 \text{ pu}$	$IL2 = 2/3 \text{ pu}$	(6. 12)

(3) 無補償時の電圧降下

全負荷電流を I_{L0} とすると

$$I_{L0} = I_{P0} + jI_{Q0}$$

$$\left| I_{L0} \right| = 1.0 \quad I_{P0} = 0.85 \quad I_{Q0} = \sin(\cos^{-1} 0.85) = 0.53 \quad (\text{負荷力率} 0.85)$$

それぞれ 式 (6. 10) ~ (6. 12) に示した負荷配分の各ケースに対して電圧降下を求めると図 6. 38 の通りとなる。

これより、無補償時には系統電圧が、その許容値に対して大きく降下してしまうことが分かる。

(4) 補償点と補償方式

補償装置設置点は系統中間とし、図 6. 39 の通り中間点負荷の下位側に設置する。

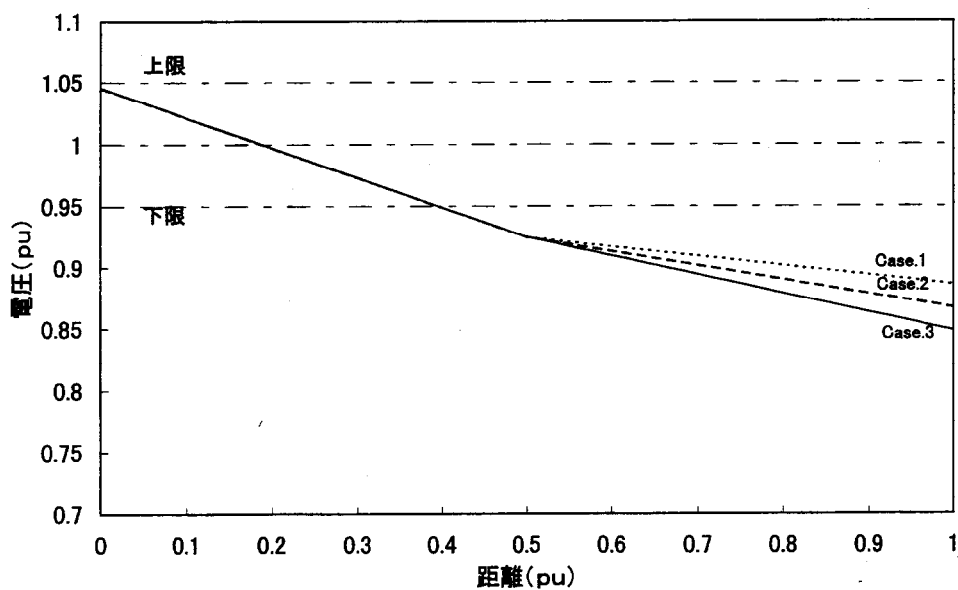


図 6. 38 無補償時の系統電圧

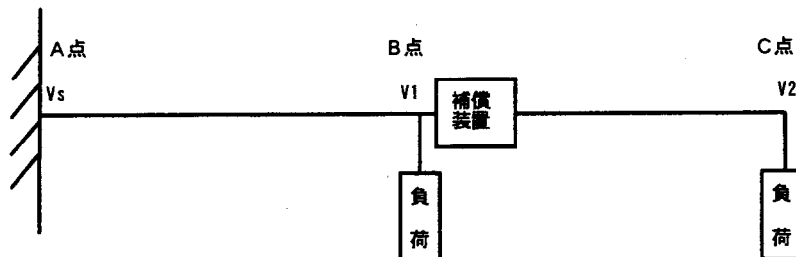


図 6. 39 補償装置設置点

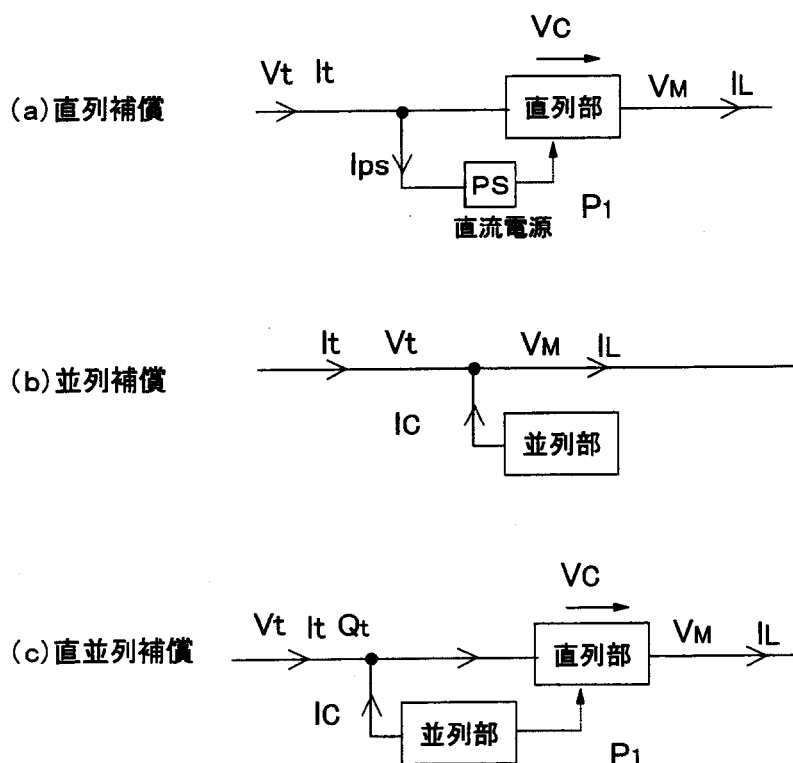


図 6. 4 0 各補償方式の構成

補償は以下の3方式とする。

- ・直列補償： 図 6. 4 0 (a) に示す構成で、直列補償は下式の通り、受電端電圧 V_t と同位相の補償電圧 V_c を注入し、末端 (C 点) の電圧が下限値以上となるように補償動作を行う。

$$\dot{V}_c = k \dot{V}_t$$

この時、直列補償部の出力力率は負荷電流と等しくなり、これが零でないため、必要な有効電力を直流電源が供給する。後で述べる装置容量にはこの直流電源容量も考慮に入れる。
- ・並列補償： 図 6. 4 0 (b) の構成により、受電端電圧 V_t を基準に、無効電流 I_c を注入し、末端電圧が下限値以上となるように補償する。
- ・直並列補償： 図 6. 4 0 (c) の構成で、並列部が装置下位側の負荷電流の無効電力成分を 100% 補償し、直列部は直列補償と同様に、受電端電圧 V_t と同位相の補償により、末端電圧を下限値以上にする。

ただし、この補償で受電端電圧 V_t が下限値以下になる場合には、並列部の出力を増加させ、 V_t が許容値以内となるように補償する。
 この場合も、直列部の補償動作に必要な有効電力は並列部により供給し、並列部の容量としてはこの分も含めて評価する。

6. 7. 2 検討

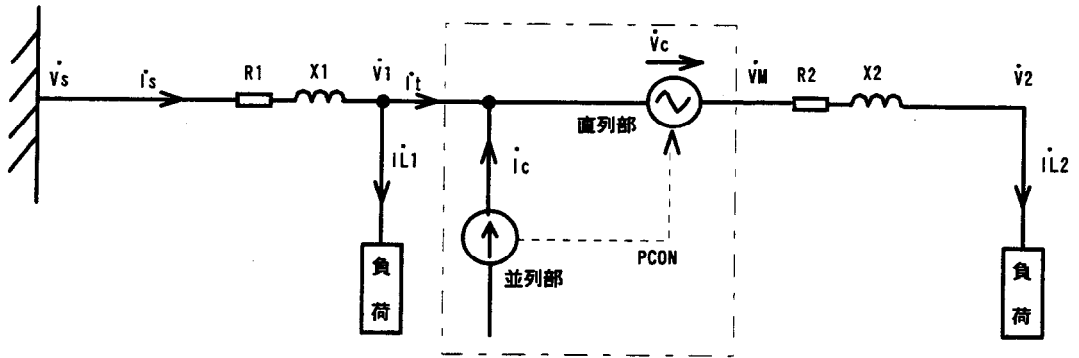


図 6. 4 1 電圧補償時の等価回路

系統電圧補償時の等価回路は図 6. 4 1 の様に表せる。これより以下の式が求められる。中間点電圧 V_1 を以下で定義する。

$$\dot{V}_1 = V_1 \quad (6. 13)$$

また、負荷電流を以下で表す。

$$\dot{I}_{L1} = I_{P1} + jI_{Q1} \quad (6. 14)$$

$$\dot{I}_{L2} = I_{P2} + jI_{Q2} \quad (6. 15)$$

$$(I_{P0} = I_{P1} + I_{P2} \quad I_{Q0} = I_{Q1} + I_{Q2})$$

直列部の補償電圧 V_c は V_1 と同相で、ゲイン k を乗じた値であるから下式となる。

$$\dot{V}_c = V_c (=k V_1) \quad (6. 16)$$

従って、直列部で補償された電圧 V_M は以下となる。

$$\dot{V}_M = \dot{V}_1 + \dot{V}_c = (1+k)V_1 \quad (6. 17)$$

ここで、直列部の動作に必要な有効電力は

$$P_{CON} = \text{Re}[\dot{V}_c \cdot \dot{I}_{L2}] = kV_1 \cdot I_{P2} \quad (6. 18)$$

であるから、並列部の電流は、補償電流 I_c と上記の有効電力を供給するために

$$\dot{I}_c = -kI_{P2} + jI_c \quad (6. 19)$$

となる。そこで、直並列形補償器の入力電流 I_t および系統電流 I_s は以下となる。

$$\dot{I}_t = (1+k)I_{P2} + j(I_{Q2} - I_c) \quad (6. 20)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_s &= \dot{I}_{L1} + \dot{I}_t = I_{P1} + (1+k)I_{P2} + j(I_{Q1} + I_{Q2} - I_c) \\ &= I_{Ps} + jI_{Qs} \end{aligned} \quad (6. 21)$$

このとき、母線電圧 V_s を下式で表すと、

$$\dot{V}_s = V_s \cos \theta + jV_s \sin \theta \quad (6. 22)$$

中間点電圧 V_1 は以下の通りとなる。

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= V_1 = \dot{V}_S - (R_1 + jX_1)\dot{I}_S \\ &= V_S \cos \theta - R_1 I_{PS} + X_1 I_{QS} + j\{V_S \sin \theta - X_1 I_{PS} - R_1 I_{QS}\}\end{aligned}\quad (6. 23)$$

ここで

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{X_1 I_{PS} + R_1 I_{QS}}{V_S} \right) \quad (6. 24)$$

以上より、中間点電圧 V_1 は下式の通りとなる。

$$\dot{V}_1 = V_S \cos \theta - R_1 I_{PS} + X_1 I_{QS} \quad (6. 25)$$

また、末端電圧 V_2 は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \dot{V}_M - (R_2 + jX_2)\dot{I}_{L2} \\ &= (1+k)\dot{V}_1 - R_2 I_{P2} + X_2 I_{Q2} - j(X_2 I_{P2} + R_2 I_{Q2})\end{aligned}\quad (6. 26)$$

以上より補償装置上位側電圧 V_1 と下位側電圧 V_2 の大きさは以下で表される。

$$|\dot{V}_1| = |V_S \cos \theta - R_1 I_{PS} + X_1 I_{QS}| \quad (6. 27)$$

$$|\dot{V}_2| = \sqrt{\{(1+k)V_1 - (R_2 I_{P2} - X_2 I_{Q2})\}^2 + (X_2 I_{P2} + R_2 I_{Q2})^2} \quad (6. 28)$$

このとき補償装置容量は直列部と並列部でそれぞれ S_S , S_P とすると下式となる。

$$S_S = |\dot{V}_C| I_N = |kV_1| \quad (I_N: \text{系統定格電流}) \quad (6. 29)$$

$$S_P = V_N |\dot{I}_C| = V_N \sqrt{(kI_{P2})^2 + I_C^2} \quad (V_N: \text{系統定格電圧}) \quad (6. 30)$$

また、送電線のロス P_{loss} は以下で表される。

$$\begin{aligned}P_{loss} &= R_1 |\dot{I}_S|^2 + R_2 |\dot{I}_{L2}|^2 \\ &= R_1 \{(I_{P0} + kI_{P2})^2 + (I_{Q0} - I_C)^2\} + R_2 (I_{P2}^2 + I_{Q2}^2)\end{aligned}\quad (6. 31)$$

以上の式に対して、以下の条件を入れて、それぞれの補償方式における各負荷配分ケースの電圧と送電ロスを求める。

系統インピーダンスと負荷は

$$\begin{aligned}I_{L0} &= I_{P0} + jI_{Q0} \\ |I_{L0}| &= 1.0 \quad I_{P0} = 0.85 \quad I_{Q0} = \sin(\cos^{-1} 0.85) = 0.53 \quad (\text{負荷力率} 0.85) \\ R_0 &= 0.13 pu \quad X_0 = 0.23 pu \quad (2.5 \text{MVA}, 10 \text{km})\end{aligned}$$

より

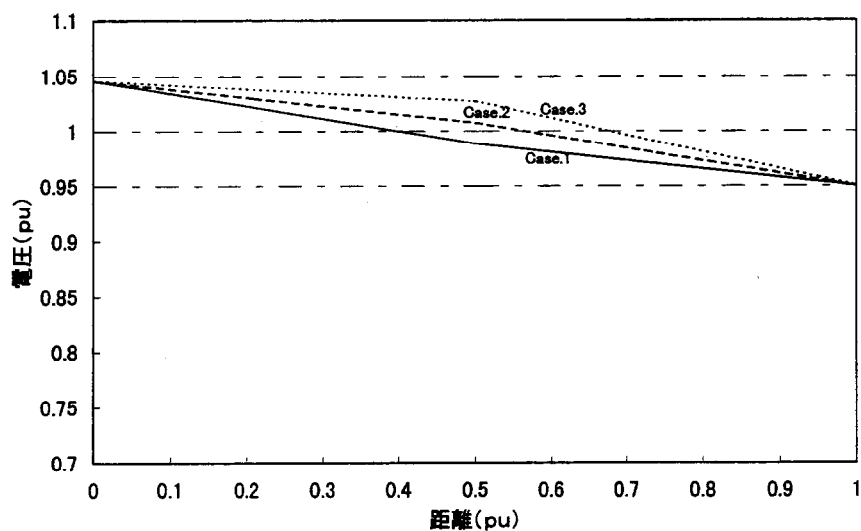
$$X_1 = X_2 = \frac{1}{2} X_0 = 0.115 \quad R_1 = R_2 = \frac{1}{2} R_0 = 0.065 \quad (6. 32)$$

$$\text{Case 1. } I_{P1} = 2/3 I_{P0} \quad I_{P2} = 1/3 I_{P0} \quad I_{Q1} = 2/3 I_{Q0} \quad I_{Q2} = 1/3 I_{Q0} \quad (6. 33)$$

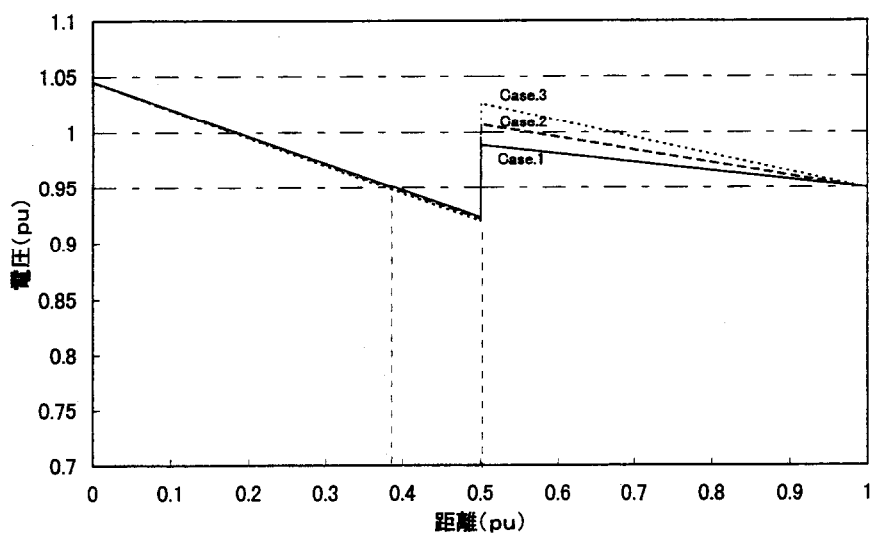
$$\text{Case 2. } I_{P1} = 1/2 I_{P0} \quad I_{P2} = 1/2 I_{P0} \quad I_{Q1} = 1/2 I_{Q0} \quad I_{Q2} = 1/2 I_{Q0} \quad (6. 34)$$

$$\text{Case 3. } I_{P1} = 1/3 I_{P0} \quad I_{P2} = 2/3 I_{P0} \quad I_{Q1} = 1/3 I_{Q0} \quad I_{Q2} = 2/3 I_{Q0} \quad (6. 35)$$

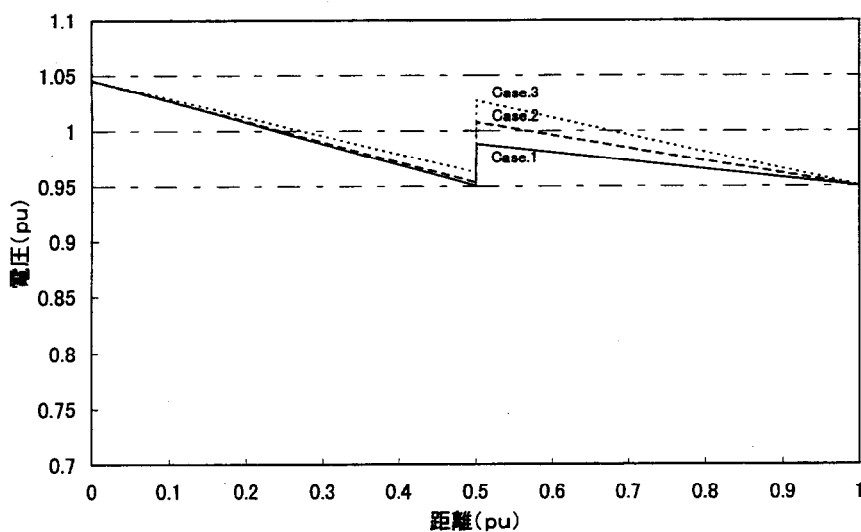
となる。以上の条件をもとに計算すると図 6. 4 2 の結果となる。



(a) 並列補償



(b) 直列補償



(c) 直並列補償

図 6. 4 2 各補償方式における電圧補償特性

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

以上の電圧補償特性において、すべての補償方式で Case1～Case3 の負荷条件に対して、末端電圧は目標値に補償されている。しかし、直列補償では系統全体の約12%の領域で、電圧許容範囲を逸脱してしまうことが分かる。一方、並列補償と直並列補償では全領域で所定の電圧に補償できている。

図 6. 4 3 は以上の各補償を行う際の装置容量である。この場合、並列補償時の容量で規格化している。

これより、並列補償は、最も装置容量が大きくなり、直並列補償はその1/2以下で済むことが分かる。直列補償の容量は更に小さくて済み、直並列補償の1/2以下となっている。

図 6. 4 4 は、各ケースにおける送電損失を表している。この図では、無補償時の送電損失で規格化し、これに対する比率で表している。

直列補償は、電圧をステップアップすることで系統上位側電流が増えることから送電損失は無補償時より増える傾向にある。一方、並列補償は10%～25%、直並列補償は約15%の損失改善が出来ている。

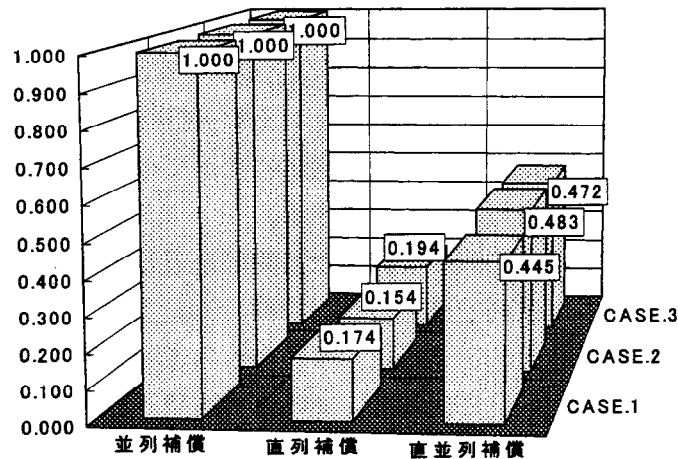


図 6. 4 3 各補償方式における所要装置容量（並列補償容量で規格化）

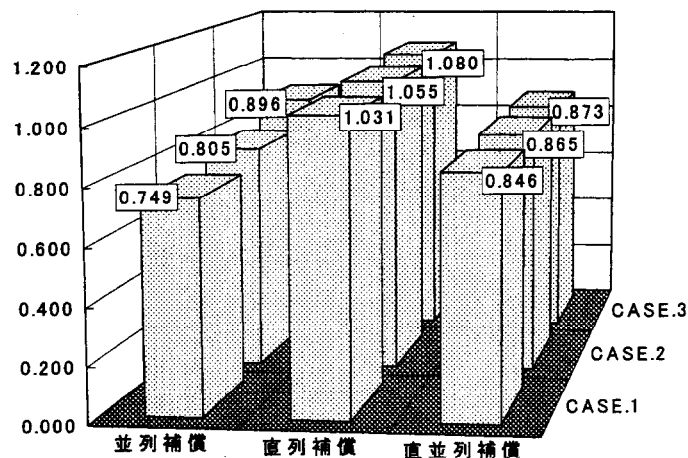


図 6. 4 4 各補償方式における送電損失（無補償時の損失で規格化）

6. 7. 3 フィージビリティースタディーの考察

以上の検討結果より次のことがいえる。

- ・直列補償は補償装置下位側の系統に対しては、極めて小容量（並列補償に比べて $1/5$ 以下 直並列補償に比べて $1/2$ 以下）で電圧補償を行うことができる。しかし、上位側の系統に対しては、全く補償ができない（無補償時比べてむしろ悪化する）ため、この領域で電圧許容変動範囲を逸脱してしまう。

系統上位側の電圧補償のできない直列補償の場合、補償装置を系統に複数台分散配置することが必要になると考えられる。

また直列補償の場合、送電損失の改善が行えないことも他の2方式に比べて、劣る点である。

- ・並列補償の場合、系統全体で所期の電圧が補償できる。但し、配電系統の様な抵抗分の大きな送電線路では、無効電力のみによる電圧補償は困難であり、装置容量が大型化してしまう。末端電圧を許容値以内とするために、進相補償を行うが、今回のケースでは母線側でも進み力率となる。

送電損失は無補償時に比べて $10 \sim 25\%$ 改善できている。

- ・直並列補償も前記のケースでは、配電系統の全領域で電圧変動を所定の範囲に保つ補償が出来ている。これら直列補償と並列補償それぞれの特徴を兼ね備えており、直列補償に比べれば装置容量は大型化するが、並列補償に比べて小容量（ $1/2$ 以下）での電圧補償と送電損失改善の双方を行うことができる。

直並列補償の電圧補償では、これが直列部と並列部を兼ね備えていることから、補償特性に自由度が増えている。直列補償及び並列補償のみの場合、今回の検討の様に末端電圧（V2）を所定値に維持しようとするれば、系統全体の電圧改善曲線が一義的に決まってしまう。図 6. 4 5 はCase 1に対して決まる直列補償、並列補償双方の電圧補償特性を示している。

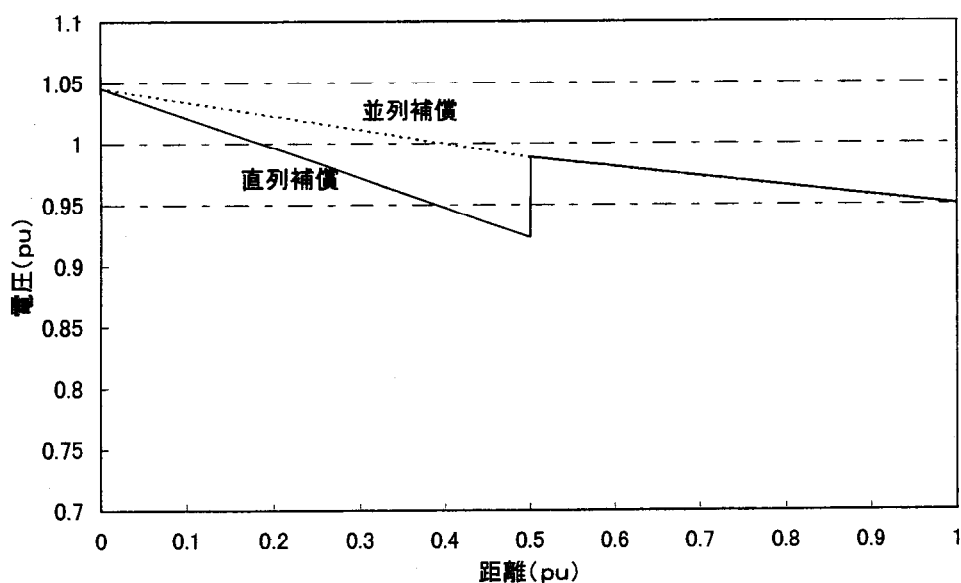


図 6. 4 5 直列補償と並列補償の電圧補償特性

第6章 系統電圧の直並列形補償器による安定化

これに対して、直並列補償では、末端電圧（V2）制御に加えて、例えば中間点（受電点）電圧（V1）の補償も可能である。これは直列部と並列部の補償量の配分を変えることで調整できる。

直並列補償の補償アルゴリズムは前述した通り、以下を基本としている。

並列補償 : 補償装置下位側負荷の取る無効電力補償

直列補償 : 補償装置下位側電圧の瞬時値補償

このように機能分担することで、相互の干渉を抑制して高速電圧補償時を行う。

ただし、Case 1の補償においては、直並列形補償器が上記の通りの補償を行った場合、中間点電圧V1は下限値を逸脱する結果となる。そこで前記図 6. 4 2 (c) に示した補償特性では、Case 1に対しては並列部の補償を増やしてV1下限値以上を維持させた。図 6. 4 6 は、同様にCase 1に対し直並列補償の補償パターンを変化させた場合の電圧特性を示している。

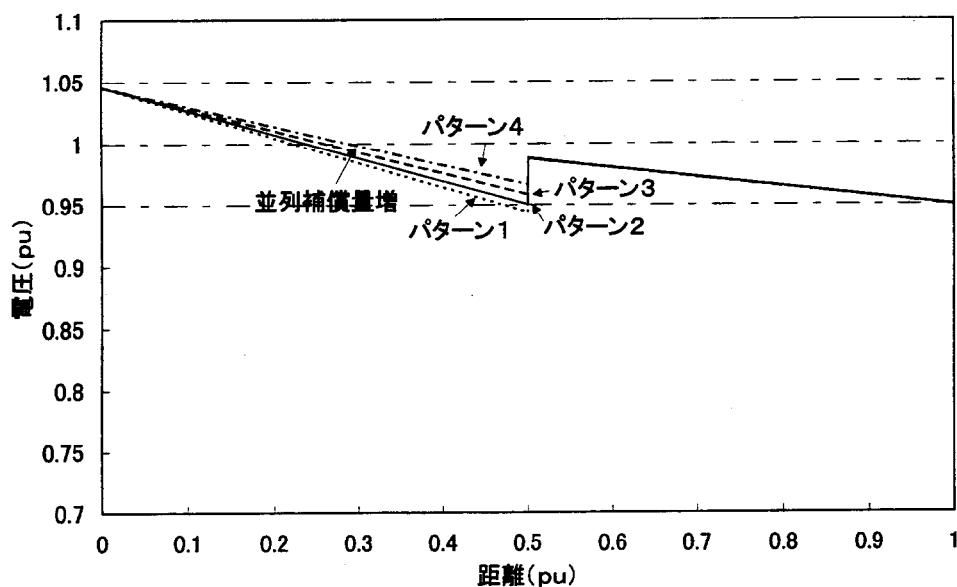


図 6. 4 6 直並列補償の補償パターン

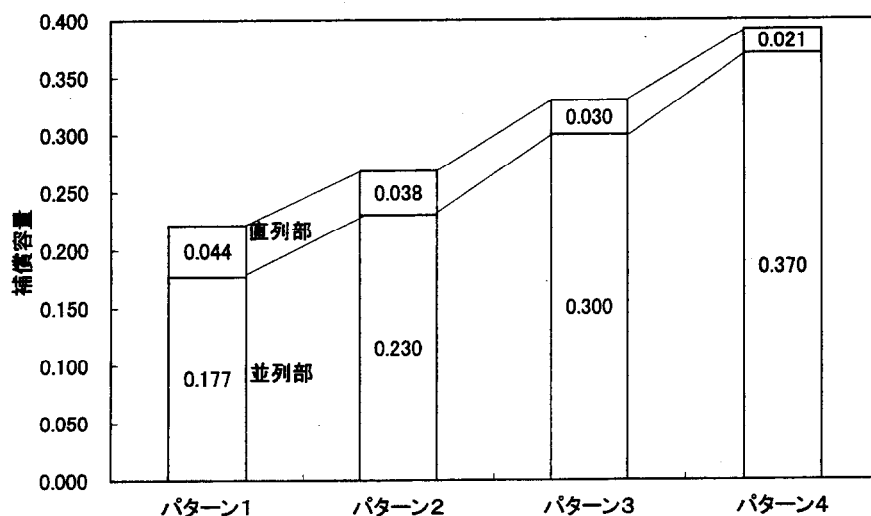


図 6. 4 7 各補償パターンの補償容量

図 6. 4 6 の中で、パターン1 が基本的な補償方式に従った特性であり、パターン2 は並列補償容量を増やして中間点電圧 (V_1) を所定値に改善したものである。パターン3, パターン4 とそれぞれ並列部の補償容量を共に増加させている。これら各パターンでの電圧補償を行うときの補償容量を図 6. 4 7 に示す。これより分かるように、直列部と並列部の補償量を調整することで、図 6. 4 5 に示した直列補償と並列補償との間で、システム全体として適切な補償特性を設定することが出来る。

図 6. 4 8 に示すのは直並列補償器の新しい考えに基づく出力設定制御部である。ここでは、負荷電流 I_L をもとに目標電圧 $|V_M|^*$ と $|V_t|^*$ を求める。このとき $|V_M|^*$ は、系統末端までの送電線インピーダンスから末端点の電圧降下を求め、これを補う設定とするLDC (Line Drop Controller) 機能を持たせ、直列部の出力電圧指令 V_{CON}^* を生成する。並列部は負荷電流の無効電流成分から求めるが、ここでは負荷無効電流 I_{LQ} の変化分を補償する構成としている。 $|V_t|^*$ は、並列部により補償する受電端電圧の目標値であり、負荷電流に応じて許容電圧以内で運転損失が最小になるなどの条件で演算する。この指令をAVRに入力し、前記の負荷無効電流の変化分とを加算して、並列部の補償電流指令 I_{CON}^* を作る。このとき V_t に対するAVR系の応答は比較的遅くし、直列部の電圧制御との干渉を抑制するようにしている。以上により、末端電圧と中間電圧の双方を効果的に補償することが可能と考える。

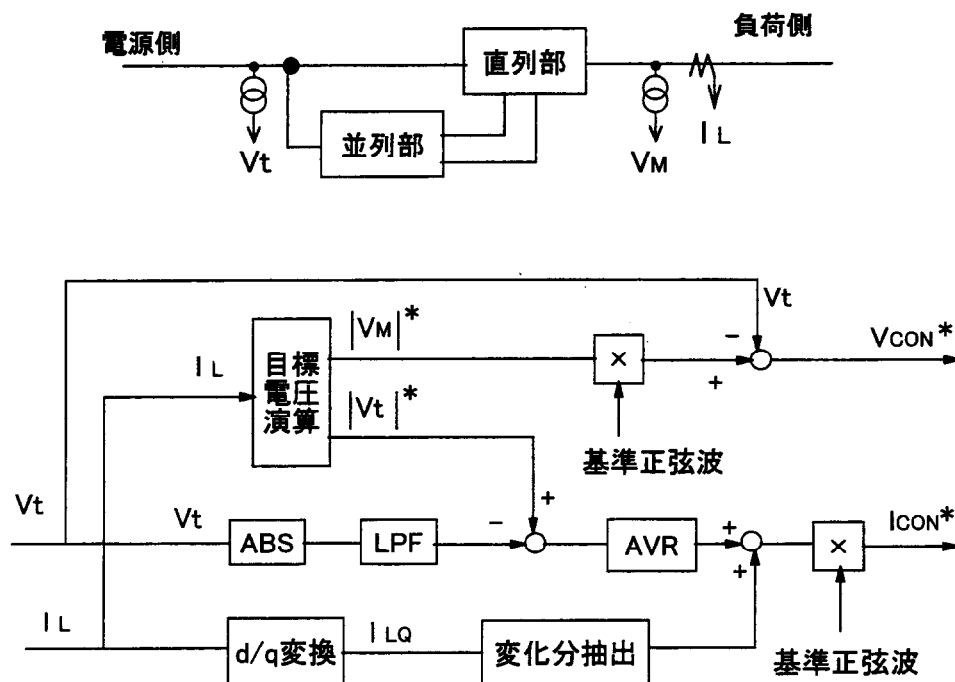


図 6. 4 8 直並列形補償器の高機能的出力設定制御部

6. 8 まとめ

本章では、電力系統に対してそれぞれ直列接続及び並列接続される直列部と並列部を有した、直並列形補償器について述べた。以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) 直並列形補償器の等価回路は、系統に直列の電圧源と並列の電流源で表され、この電圧源と電流源はこれらトータルの電力発生や消費が無いように、直流リンク回路を介して双方向に電力融通が行われることを示した。
- (2) この装置の補償原理として、並列部は下位側負荷のとり無効電力と逆相電力を補償し、直列部は並列部での補償が困難な上位側負荷による電圧変動や不平衡の補償と送電線の抵抗成分による電圧変動の補償を行う。これにより、以下の補償が可能となることを述べた。
 - ・下位側負荷による電圧変動と電圧不平衡
 - ・下位側負荷による電圧位相変動
 - ・上位側で発生した電圧変動と電圧不平衡
 - ・送電線路抵抗分による電圧変動

従って、本装置を系統中間点に設け、この点で系統の電圧障害を一括して補償する応用が考えられることを示した。

- (3) この補償を行うための制御方式とブロック図を示し、シミュレーションによりまず評価を行った。これよりほぼ理論通りの性能が得られることを確認した。
- (4) 16kVA実験装置によりその性能検証試験を行った。試験では、直並列補償に加え、直列補償、並列補償のみの補償特性と比較して行った。この試験により、直並列補償が上記の補償動作を問題なく行えることを示した。
- (5) 配電系統に直並列補償器を設置することを想定したフィージビリティスタディーを行った。検討ケースでは、こう長10kmの配電線における重負荷(2.5MVA)時の電圧改善について解析した。
- (6) 直列補償は補償装置設置点下位側の電圧に対しては、極めて小容量(並列補償に比べて約1/5)で電圧補償が行えるが、上位側電圧の補償が出来ず、送電損失改善には全く効果の無いことを示した。
- (7) 無効電力の注入により電圧補償を行う並列補償は、系統全域の電圧補償が可能であり、また送電損失も解析ケースでは最高25%の改善効果が認められた。しかし、配電線の抵抗成分により、完全な電圧補償を行うことが困難であり、装置容量が大型化してしまうと共に、解析したケースでは系統母線側で進み力率となってしまうことを示した。
- (8) 直並列形補償器は、これら直列補償と並列補償双方の特徴を合わせもつ補償装置である。解析ケースでは直列補償に比べ装置容量は大きくなるものの、並列補償に比べて1/2以下の小容量で配電系統全域の電圧補償が行え、送電損失の改善も並列補償と同等の効果が得られることを示した。特に電圧補償では、直列部と並列部の補償容量分配を変えることで、系統上位側と下位側の電圧補償特性を調整でき、装置容量の最小化などの設定の行えることを述べ、その新しい制御構成例を示した。

第 7 章

結論

第7章 結論

電力需要が今後も堅調に伸びる中で、その供給源の新設立地の制約から長距離送電や重潮流化が進む。更に、電力の規制緩和に伴うIPP (Independent Power Producer)、分散電源の導入など電力系統の複雑化が予想される。一方、コンピュータ社会、高度情報通信社会が進み、これを支える機器の普及は電力品質の維持・向上を一層強く要求していくものと考えられる。このような状況のもと、電力品質に対する系統制御は、もはや従来機器だけでは困難となることが予想され、パワーエレクトロニクスによる新しい電力系統制御装置に期待が寄せられている。パワーエレクトロニクスは、産業分野を中心に、パワー半導体デバイスやマイクロプロセッサの進歩と共に著しい発展を遂げてきた。そして、これらデバイスの大容量化、高信頼化に依り、電力系統分野への本格的応用が可能となり、その使命は、従来機器では不十分であった高速、高機能性を駆使して、電力系統の送配電性能を効果的に改善し、高電力品質をもたらすことにある。

以上を背景として、本研究では電力品質のうちで身近な「電圧」に注目し、これを改善する新しい機器として、自励式変換装置を用いた電圧安定化装置とその制御を検討した。自励式変換装置による電圧安定化装置としては、例えば、単純な電圧変動補償用として自励式無効電力補償装置（自励式SVC）が既に実用されつつあるが、ここでは電圧安定化装置への要求と自励式装置が持つ潜在能力を見極めた上で、より有効で新しい制御及び構成を検討し、これらを体系化して研究を進めることとした。そこで、新しい系統電圧安定化装置の要件を明確にするために、現状の電圧に関する問題点の様相と規制そして対策技術の発生原因の調査検討を行い、新しい装置として特に連続制御性、高速制御性、及び三相個別制御性を活かすことが有効であることを示した。このことをベースにして、前記の要求に応える電圧安定化装置として、電力系統との接続形態から、並列形補償器と直列形補償器に区分して検討を進めた。

本研究ではまず、直列補償と並列補償の基本的補償特性を解析的に求め、比較検討を行った。この結果、直列補償は補償装置設置点下位側の電圧補償、不平衡補償に対しては、並列補償の数分の一の容量で済むことを示した。しかし、補償装置上位側の系統については補償が行えず、むしろ悪化傾向となることを示した。一方、並列形補償は装置容量が大きくなるものの、装置設置点下位側だけでなく上位側も含め系統全体の補償が可能であることを示し、これら直列形補償器と並列形補償器の適正設置箇所を明確にした。

この検討を前提として、並列形補償器と直列形補償器それぞれの応用装置の検討を進めた。

並列形補償器は、いわゆる自励式SVCであり、前述の通り単なる系統電圧変動補償としては既に実用段階に入っている。本研究では、これまで研究報告の少ない三相不平衡補償と電圧動揺補償を対象とした。これらは、自励式変換装置が本質的に持つ三相個別制御性と高速制御性を活かすものであり、本研究ではこれらをより高性能化する新しい制御方式を示した。この性能は実験装置で評価し、また実機応用で所期の実用性能を検証した。

直列形補償器については、その実用はこれから広がっていくことから、主回路構成、制

第7章 結論

御・保護方式について総合的に検討を進めた。直列補償はいずれも新しい機能となる「線路リアクタンスを相殺して電圧補償を行う可変リアクタンス装置」と「直接電圧補償を行う瞬時電圧補償装置」について述べた。これらの性能はシミュレーションと実験によって理論通りのものであることを示した。

そして、最後にこれら直列形補償器と並列形補償器を統合した形態の直並列形補償器について、その制御方式を述べ、実験による性能検証結果を示した。本装置は、系統中間点にあって、系統上位と系統下位の電圧変動や不平衡を総合的に補償可能である。この直並列形補償器を配電系統中間点に設置したときのフィージビリティ検討を行い、直列形補償器や並列形補償器に比べて、高機能な電圧補償や送電損失改善が可能な高機能補償装置が実現できることを示した。

以下に各章で得られた結論を示す。

第1章 「序論」

研究の背景と目的を述べた。この中で、電力系統の状況とこれを制御する技術動向及び研究状況を示した。

第2章 「電力系統の電圧に関する諸問題と対策技術」

第2章ではまず、電力系統の電圧に関する問題として、電圧変動、電圧動揺、三相不平衡、瞬時電圧低下、高調波について、その様相、原因、機器への影響、および現状の規制値／許容値について総括して述べた。そして、これらの問題に対する現状対策機器である ・発電機 AVR ・送電線路強化 ・負荷時タップ切替え装置 (OLTC) ・調相設備 (調相用コンデンサ、調相用リアクトル) ・直列コンデンサ について、それぞれの特徴をまとめて示した。

これら現状の対策の中で、中心的役割を果たす調相設備と直列コンデンサに対して、補償特性を明確にし、これらは ①連続調整ができない、従ってステップ状の電圧調整となり、極端な場合にはハンチングのおそれがある ②応答が遅く、電圧急変、電圧動揺の補償ができず、更に電圧不安定現象や電圧崩壊に対応することができない ③ 電圧不平衡補償ができない ④直列コンデンサでは低周波共振現象発生のおそれがある などの問題点があることを述べた。

前章で述べたように、今後更に電力依存度の高まる中、分散電源やIPPの導入など複雑化する電力系統においては、電力品質の維持のために、より高度な電圧制御・補償の要求されることが予想される。そこで従来の補償装置の持つ課題を解決し、高性能化をもたらす装置として、自励式変換装置を用いた新しい電圧安定化装置について、その特徴を検討した。

この装置は、任意の出力制御が可能な電圧源または電流源として機能し、電力系統との接続形態により、並列形補償器と直列形補償器に分類できる。

これらの特徴を現状の補償装置と比較し、自励式変換装置を用いた新しい補償装置が高性能、高機能な補償装置として、三相不平衡補償装置や高速応答の要求されるフリッカ補償装置および可変インピーダンス補償装置など新しい分野に適用できることを示した。

第3章 「系統電圧の直列補償と並列補償の基本特性」

3章では直列補償と並列補償の基本的な電圧補償特性と所要容量を簡易モデルを用いて解析的に求めた。この結果、直列補償と並列補償はそれぞれ以下の特徴のあることを示した。

- ・直列補償は装置設置点下位側に対してのみ、電圧変動及び不平衡補償が可能である。

その補償容量は下式で表され、並列補償に比べて数分の一程度の小容量で済む。

$$\text{直列補償所要容量} = \text{負荷電流} \times \text{送電線路降下電圧}$$

- ・並列補償は装置設置点上位側、下位側双方に対して、電圧変動、不平衡補償が可能である。

その補償容量は下式で表され、直列補償に比べて大きな容量が必要となる。

$$\text{並列補償所要容量} = \text{負荷無効電力（逆相電力）}$$

このことより、直列補償装置は直距離送電線末端または、上位系統側の電圧変動が大きい箇所への設置に適し、並列補償装置は系統全体に対して電圧補償を行うことが必要な系統への設置に適することを述べた。

第4章 「系統電圧の並列形補償器による安定化」

電力系統の並列形電圧補償器として自励式変換器を用いた静止形無効電力補償装置（自励式SVC）の新しい機能と応用について述べた。静止形無効電力補償装置には、自励式SVCの他に、サイリスタを用いた他励式SVCがある。本章ではまず、これらの補償特性を理論解析とシミュレーションにより詳細に比較検討し、自励式SVCの優れた点を以下の通り明確に示した。

- ・三相不平衡補償： 自励式は他励式に比べて、 $1/4$ の容量で補償可能。

（負荷力率角 遅れ $\pi/6$ ～進み $\pi/6$ ）

- ・高速応答： PWM及び多重化の適用により、他励式に比べて10倍以上の高速化可能。

自励式SVCは通常の電圧補償としては既に実用段階にある。ここでは、新しい応用として、上記の自励式SVCの特性を活かす三相不平衡補償機能と電圧動揺補償機能の開発について述べた。

三相不平衡補償制御は、電流を回転座標変換によりそれぞれ2軸量の正相分と逆相分に分離し、各々を非干渉化してフィードバック制御することの特徴とし、高速、高精度を実現する新しい制御方式である。これは、出力電圧制御を行う際、位相と振幅により変調ができ、高速PWMを必要としないため、大容量装置への適用性に優れている。本論では、装置の主回路構成例として3パルスPWMインバータの6多重方式を示し、不平衡補償において特異となる所要直流コンデンサ容量の求め方を示した。そして、制御構成と制御各部の機能及びその理論的根拠を示した。この装置に対して、実験装置を用いて性能検証し、不平衡補償時の補償誤差が総合5%以内（設定に対しては2%以内）と高精度であり、過渡応答は25msであることを示した。更に、実際の電鉄負荷系統に対する応用を示し、所期の不平衡補償が行えることを述べた。

電圧動揺補償制御は、系統の電圧動揺を引き起こす変動電流成分の高速抽出演算とこの演算結果を指令として追従する高速応答が課題となる。これに対して、有効、無効電流および逆相電流それぞれの変動分を抽出し、これを出力指令として合成する指令演算回路と、出力

第7章 結論

インピーダンスに基づくフィードフォワード制御を併用した瞬時ACR（電流フィードバック制御）による制御構成を示した。また、実用化の上で必要なPWM時の予測演算を適用したデッドタイム補償や離散値フーリエ変換による特定次数抽出演算などの周辺制御技術についても述べた。そして、実験装置でこれらの性能を検証し、設定制御誤差5%以内と高精度でありながら、応答時間約1msの高速応答性能を実現した。また実際のアーク炉負荷に対する応用を行い所期の性能であることを確認した。

第5章 「系統電圧の直列形補償器による安定化」

電力系統に直列接続されて電圧補償を行う直列形補償器は、半導体高速移相器と同様の構成をしており、制御方式によって、①可変インピーダンス ②電圧調整 ③移相調整 の機能を実現できる。本論では、これらのうちで、新しい応用として①と②の機能による可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置について述べた。

可変リアクタンス装置は、系統に直列接続され、系統電流位相に対して常に直交位相の電圧を出力し、等価的リアクタンスとして動作する装置である。そこで、これを直列コンデンサとして動作させれば、系統の誘導性リアクタンスを相殺し、これによる電圧降下を補償できる。この新しい補償装置の主回路構成方法を示し、不平衡補償までを考慮した制御方式を述べた。また、直列形装置で留意すべき系統短絡故障時の過電流に対する保護として、リアクトル動作による限流機能と、3巻線トランスを用い、この3次巻線をサイリスタスイッチで短絡する全く新しい保護方法を示した。これらの制御及び保護性能はシミュレーションと実験により確認した。シミュレーションでは、負荷急変時に、直列コンデンサが低周波振動を引き起こすのに対して、極めて安定な応答のできることを示した。また、実験では、静特性を取得し、電圧変動をほぼ零に改善し、不平衡電圧を1/5以下に補償できることを検証した。また、過渡特性と高調波、系統過電流に対する保護動作についても実験評価し、所期の性能であることを示した。更に、補償誤差について考察し、これが系統インピーダンスの誤差と装置内部インピーダンスによるものであることを述べ、これに対する対策法方を示した。

瞬時電圧補償装置は、系統に直列接続され、その出力電圧を直接印加する形で電圧補償動作を行い、可変リアクタンス装置では不可能であった系統上位側での電圧変動を補償できる特徴がある。この装置の制御方式として、リアクタンス補償機能を具備させた瞬時電圧補償制御を示した。これは、以下の通り広範な補償が行える。

- ・下位側負荷による系統リアクタンス電圧降下と位相変動
- ・上位側で発生した電圧変動
- ・系統線路の抵抗成分による電圧降下

この装置に対して、シミュレーションを行い、上位側及び下位側負荷による変動が1ms以内で補償できることを示した。また、位相変動も理論通り補償できることを示した。そして、実験により、上位側、下位側負荷に対する電圧変動と不平衡及び位相変動に対する補償特性を求め、良好な改善効果を確認した。特に、上位側負荷については、可変リアクタンス装置に比べて、瞬時電圧補償の利点を明確に示した。また、過渡応答も数msで応答できる

ことを示した。

以上、可変リアクタンス装置と瞬時電圧補償装置の両者を比較し、前者が上位系統（基幹系統）での電圧補償に適し、後者は配電系統以下の比較的小容量領域での使用に適することを示した。

第6章 「系統電圧の直並列形補償器による安定化」

6章では、電力系統に対してそれぞれ直列接続及び並列接続される直列部と並列部を有した、直並列補償器について述べた。この等価回路は、系統に直列の電圧源と並列の電流源で表され、この電圧源と電流源はこれらトータルの電力発生や消費が無いように、直流リンク回路を介して双方向に電力融通が行われることを示した。そして、この装置の補償原理として、並列部は下位側負荷の取る無効電力と逆相電力を補償し、直列部は並列部での補償が困難な上位側負荷による電圧変動や不平衡の補償と送電線の抵抗成分による電圧変動の補償を行う。これにより、以下の補償が可能となる。

- ・ 下位側負荷による電圧変動と電圧不平衡
- ・ 下位側負荷による電圧位相変動
- ・ 上位側で発生した電圧変動と電圧不平衡
- ・ 送電線路抵抗分による電圧変動

直並列形補償器は他の直列形補償器や並列形補償器に比べ補償機能が高く、電圧変動や電圧不平衡の発生原因が、系統上位、下位に係わりなく補償できる。これによって、電圧障害を系統の下位または上位に波及することを妨げる効果がある。従って、本装置を系統中間点に設け、この点で系統の電圧障害を一括して補償する応用が考えられることを述べた。

そして、この補償を行うための制御方式とブロック図を示し、シミュレーションと実験装置によりその性能検証を行い、直列補償又は並列補償のみの補償特性と比較した。これより、直並列補償器が前記の補償動作を問題なく行える優れた補償性能であることを実証した。

更に、配電系統にこの直並列補償器を設置することを想定したフィージビリティスタディを行った。検討ケースでは、こう長10 kmの配電線における重負荷（2.5 MVA）時の電圧改善について解析した。この結、直列補償は補償装置設置点下位側の電圧に対しては、極めて小容量（並列補償に比べて約1果/5）で電圧補償が行えるが、上位側電圧の補償と送電損失改善には全く効果の無いことを示した。

無効電力の注入により電圧補償を行う並列補償は、系統全域の電圧補償が可能であり、また送電損失も解析ケースでは最大25%の改善効果が認められた。しかし、配電線の抵抗成分により、無効電力だけで完全な電圧補償を行うことが困難であり、装置容量が大型化してしまうと共に、解析したケースでは系統母線側で進み力率となってしまうことを示した。

直並列形補償器は、これら直列補償と並列補償双方の特徴を合わせもつ補償装置である。解析ケースでは直列補償に比べ装置容量は大きくなるものの、並列補償に比べて1/2以下の小容量で配電系統全域の電圧補償が行え、送電損失の改善も並列補償と同等の効果が得られることを示した。特に電圧補償では、直列部と並列部の補償容量配分を変えることで、系統上位側と下位側の電圧補償特性を調整でき、装置容量の最小化などの設定の行えることを述べ、その新しい制御構成例を示した。

今後の課題は以下の通りである。

並列形補償器については、既に実用化のステージにあり、大容量自己消弧素子の開発及びその適用技術開発と共に、今後は装置の大容量，高信頼そして低コスト，コンパクト化を果たし、基幹系統へ適用するための実用開発が必要となる。また一方で分散電源の大幅導入が予想される配電系統への適用も望まれ、このために必要な小形化，低コスト化，省保守化の開発、更にこの最適容量，最適配置の導出と系統全体での有効な運用方式が課題となる。

直列形補償器及び直並列形補償器については、実用はこれからであり、実用試作器の開発とフィールドでの検証が必要である。直列補償は並列形に比べ小容量で済むメリットがあるものの、本質的に直列機器であるため、高信頼性の確保と系統短絡時の保護について十分な検証評価を行っておくべきである。

系統電圧安定化装置の研究 参考文献リスト

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
1	1	関根, 高橋	21世紀の電力エネルギーと輸送技術	電学誌	112	8号	582～586	1992
2	1	土森, 長澤	系統構成, 運用の高度化	電学誌	112	8号	592～596	1992
3	1	長谷川	パワーエレクトロニクス技術の最近の動向とその応用—パワーエレクトロニクス技術の電力への適用—	電気評論	-	8	806～813	1989
4	1	林	電力分野におけるパワーエレクトロニクス	電学誌	113	10月	-	1993
5	1		21世紀のパワーエレクトロニクス	電気学会雑誌,	112	9号	-	1992
6	1	深尾	電力系統応用パワーエレクトロニクス機器の現状と課題	電学産業応用部門大会	-	S. 8-1	S. 23～26	1996
7	1	奥田浩司	最近のパワーエレクトロニクスとその応用 配電機器への応用	電学関西支部専門講習会	-	-	54～61	1996
8	1	青嶋	最近のパワーエレクトロニクスとその応用 電力系統への応用	電学関西支部専門講習会	-	-	71～83	1996
9	1	市川	将来の電力用パワーエレクトロニクス	電学全国大会	-	S. 15-5	-	1996
10	1	林, 桜井	パワーエレクトロニクス応用技術の現状と展望	電学論B	117	7号	901～904	1997
11	1	中川	電力系統におけるパワーエレクトロニクスの応用	半導体電力変換装置研究会	SPC	98-14	-	1998
12	1	関根, 林	広域・大電力送電のための連系強化技術開発—プロジェクトの概要とこれまでの成果—	電学論B	114	10号	-	1994
13	1	中島 他	高性能直変換器の開発	電学論B	117	7号	1006～1015	1997
14	1	Sekine, Takahashi	Application of power electronics technologies to the 21st century's bulk power transmission in Japan	International journal of Electrical Power & Energy Systems	17	3	181～193	1995
15	1	N. G. Hingorani	Flexible AC Transmission System (FACTS) Overview	IEEE	Winter Power Meeting	-	-	1990
16	1	Gyugyi	SOLID-STATE CONTROL OF AC POWER TRANSMISSION	EPRI WORKSHOP	Nov. 14	-	-	1990
17	1		フレキシブル交流送電システム: FACTS (EPRIの新研究構想の紹介と一考察)	IEEE海外情報	-	9003	-	1990

参考文献

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
18	1	嶋田	パワーエレクトロニクス応用による新送電システム	電学誌	112	1号	-	1993
19	1	栗田篤	米国電力中央研究所のFACTS構想	電力中央研究所報告	-	T92020	-	1993
20	1		Advanced Series compensator Enhances Flexibility for AC Transmission Systemus IEE 2nd Internationel Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management	IEEE 2nd International Conference Record	-	-	584～591	1993
21	1	Gyugyi	The unified power flow controller: A NEW APPROACH TO POWER TRANSMISSION CONTROL	IEEE Transactions on Power Deliverly	10	2	-	1995
22	1	N. G. Hingorani	Intoroducing Costom Power	IEEE SPECTRUM	june	-	-	1995
23	2	田村	電力システムの計画と運用	オーム社	-	-	19～22	-
24	2	関根	配電技術総合マニュアル	オーム社	-	-	40～50	-
25	2		電力系統の電圧安定維持対策	電気学会技術報告	Ⅱ部	73号	-	1979
26	2, 4	Hirakawa, Eguchi et. al.	SELF-COMMUTATED SVC FOR ELECTRIC RAILWAYS	IEEE-PEDS' 95	2	-	732～737	1995
27	2		製鋼用アーク炉と電力供給に関する最近の動向	電気学会技術報告	Ⅱ部	72号	-	1979
28	2	権藤豊美	不平衡負荷の最近の動向と設備上の留意点	OHM	-	1	37～41	1977
29	2	新田目	電力系統技術計算の応用	電気書院刊	-	-	429～430	-
30	2		瞬時電圧低下対策	電気協同研究	46巻	3号	-	1990
31	2	正田	電力系統における高調波とその対策	OHM	-	7	-	1990
32	2		高調波ひずみ抑制のための新ガイドライン	OHM	-	9	42～49	1994
33	2		電力系統安定運用技術	電気協同研究	47巻	1号	-	1992
34	2		電力系統の安定化技術	電気学会技術報告	Ⅱ部	238号	-	1986
35	2	A. Kurita and T. Sakurai	The Power Failure on July 23, 1987 in Tokyo	Proc. of the 27th conference on Decision And Control	-	-	-	1988

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
36	2	室谷, 浅野	直列コンデンサ適用に伴う回路現象	日新電機技報	20	1	34~46	1975
37	4	岡崎・小西・加護谷	最近の無効電力補償システム	富士時報	166	No. 10	638~643	1993
38	4	柳谷・楠本・山添	高圧大容量変換装置	富士時報	161	No. 5	351~352	1988
39	4	石井・小森・茂木・宮田・谷口	東海道新幹線電源増強用 SVC の計画と運転実績	電学全国大	-	601	-	1993
40	4	近藤	パワーエレクトロニクス技術の最近の動向とその応用ー静止形無効電力補償装置の技術動向ー	電気評論	-	8	814~821	1989
41	4	松野・長澤・大槻・大西・石黒・竹田	自励式インバータを用いた静止形無効電力補償装置による系統安定度の向上	電学論 B	112	1号	-	1992
42	4	市川	大容量自励式変換器を用いた静止形無効電力補償装置 (自励式 SVC)	電学論 B	112	6号	-	1992
43	4	松本	コンデンサとリアクトルによる 3 相電源の相平衡法	デンセイ	16	2	54~69	1974
44	4	Sadek	Balancing of unbalanced loads using static VAR compensators	Electro Power Syst Res	32	2	38.05.1~38.05.6	1988
45	4	持永, 石井, 後藤, 中村	静止形逆相電流補償装置	電学全国大会	-	1151	-	1990
46	4	藤田 他	自励式変換器による系統電圧不平衡補償装置の制御アルゴリズム	電力技術研究会	PE	92-64	-	1992
47	4	関, 内野	大容量自励式変換装置のスイッチング周波数と多重化の考察	電学論 D	114	5号	-	1994
48	4	山本, 小西, 江口, 森田	不平衡機能付き自励式 SVC 制御方式の開発	電学全国大会	-	604	-	1993
49	4	森田, 山本, 小西, 江口	不平衡補償機能付き自励式制御方式の開発	電学産業応用部門大会	-	100	-	1993
50	4	江口・山本・遠藤・小西・森田	不平衡補償機能付き自励式 SVC 制御方式の開発	電学論 D	114	4号	444-450	1994
51	4	Eguchi, Imura	Self-commutated inverter for fuel cell power plant	IEEE IAS Proceeding	-	-	527	1986
52	4	Edane, Eguchi, Yamamoto	DDC controller for inverter in fuel cell dispersed generation plant	PCC-Yokohama Proceeding	-	-	635~640	1993
53	4	平川・松浦・江口・山本・小西・馬場	電気鉄道用静止形無効電力発生装置のミニモデルによる検証試験	電気学会産業応用全国大会	-	189	-	1994

参考文献

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
54	4	土井迫, 小森, 中森, 江口, 馬場	電気鉄道用静止形無効電力発生装置の系統解析	電学産業応用部門大会	-	189	-	1994
55	4	中森, 江口	系統連系用多重インバータ変圧器の直流過電圧現象の解析	電学全国大会	-	552	-	1994
56	4	飯塚, 中間, 金山, 小林他	新幹線変電所における静止形無効電力発生装置 (SVG) の導入	電学全国大会	-	1086	-	1994
57	4	Schauder et.	Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission System	IEEE Transaction of Power Delivery	10	3	1486~1496	1994
58	4	Nakamori, Eguchi, et. al.	SVC CONTROL SYSTEM FOR ARC FURNACES	IPEC-Yokohama' 95, Proceeding	11	-	615~620	1995
59	4	Yoshioka, Konishi, Eguchi, et. al.	Self-Commutated Static Flicker Compensator for Arc Furnaces	APEC' 96 Proceeding	-	-	-	1996
60	4	真野・山本・江口・遠藤・吉岡・小西・日野	フリッカ補償用自励式無効電力補償装置の開発	電気学会産業応用全国大会	-	187	-	1995
61	4	丸山, 山本, 江口, 小西	自励式フリッカ補償装置のアナログシミュレーション	電気学会産業応用全国大会	-	191	-	1995
62	4	江口, 宇都	最近の製鋼用アーク炉	富士時報	-	3月	-	1995
63	4	江口, 加藤	高性能自励式 SVC	電気評論	-	6月	57~60	1996
64	4	中森, 吉岡, 江口, 中西	高速大容量に適した系統連系インバータ	電学全国大会	-	848	-	1996
65	4	打田	SVGとアクティブフルタ	電学産業応用部門大会	-	S. 8-3	S. 31~S. 34	1996
66	5	力石・嶋田	半導体化高速移相器による同期機のフライホイール効果を利用した電力制御とその応用	電学論B	111	11号	-	1991
67	5	藤田, 他	高速移相器によるループ系統制御	電学論B	114	5号	-	1994
68	5	永田・横山・関根	高速移相器を用いた連系線電力動揺モードの安定化	電気学会全国大会	-	1151	-	1993
69	5, 6	田辺 他	高速移相器を用いた系統安定化に関する基礎研究	電学全国大会	-	1150	9-91~9-99	1993

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
70	5	有満, 力石, 上村, 嶋田	半導体化高速移相器による同期機への電力蓄積	電学産業応用部門全国大会	104	-	-	1995
71	5	上村 他	高速半導体化移相器を用いた電動機脈動電力の平滑化	電学論D	115	9号	-	1995
72	5, 6	藤田 他	系統解析シミュレータ用高速移相器による系統安定化試験	電学電力・エネルギー部門大会	-	223	45~46	1996
73	5	有満, 力石, 上村, 嶋田	半導体化移相器による電力制御 (可変リアクタンスとしての応用)	電気学会産業応用全国大会	-	103	-	1993
74		江口, 徳田, 上村, 平山, 嶋田	半導体化高速移相器による可変リアクタンス装置 (電圧変動の補償)	電学論B	116	8号	-	1996
75	5	野田	電力系統の制御	電気書院	-	-	51	-
76	5	江口・徳田・上村・片山・平山・嶋田	半導体化移相器による可変リアクタンス装置の制御と電圧補償特性	電学全国大会	-	803	-	1995
77	5, 6	P. Kuffel et al	Development and Validation of Detailed Controls Models of the Nelson River Bipole 1 HVDC System	IEEE Transaction of Power Delivery	8	1	351-358	1993
78	5	江口・徳田・上村・平山・嶋田	半導体化移相器を用いた可変リアクタンス装置の不平衡電圧補償制御	電学産業応用部門全国大会	-	54	-	1995
79	5	徳田, 江口, 上村, 平山, 嶋田	半導体化移相器による可変リアクタンス装置の電圧補償特性	電学全国大会	-	849	-	1996
80	5	江口・上村・佐藤・片山・嶋田	半導体化移相器による可変リアクタンス装置 (系統事故時の保護機能)	電学論B 研究開発レター	114	11号	-	1994
81	5	徳田, 江口, 上村, 嶋田	自励式インバータを用いた直列形電力系統補償装置の保護方式	電学全国大会	-	1518	-	1997
82	5	Tokuda, Eguchi, et al.	Series Power Line Compensator using a Self-commutated Inverter	PCC-Nagaoka*97	-	-	-	1997
83	5	徳田, 江口, 上村, 嶋田	電力系統用直列形電圧補償装置の制御方法と性能検証	電学電力・エネルギー部門大会	-	221	-	1996
84	5	徳田, 江口, 嶋田	自励式インバータを用いた直列形電力系統補償装置の保護方式	電学全国大会	-	1518	-	1997
85	6	徳田, 江口, 嶋田	自励式直並列形系統電圧補償装置	電力技術研究会	-	PE-98-14	-	1998

参考文献

No	関連章	著者	タイトル	掲載誌名	Vol	No.	頁	年
86	6	片山, 江口, 上村, 平山, 嶋田	電流注入型可変直列コンデンサの原理と動作特性	電学産業応用部門大会	-	95	-	1994
87	5, 6	原 他	サリスタ付直列コンデンサの安定度向上制御の設計手法と効果に関する基礎検討	電学全国大会	-	1153	9-97~105	1993
88	4, 5	色川	電力系統の多様化を支える自励式変換技術	電学論B	115	9号	1019~1022	1995
89	5, 6	Fujita et.	APPLICATION OF FACTS EQUIPMENT CONSIDERING JAPANESE POWER SYSTEM	IPEC-Yokohama795	-	-	131~136	1995
90	5, 6	千田 他	自励式位相調整器の瞬時値解析による検討	電学論B	117	7号	960~965	1997
91	5, 6	松野, 浅野, 大西, 陰野	一電源, 一負荷系における電圧不安定現象抑制実験	電力技術研究会	-	PE-88-119	-	1988
92	5, 6	秋山, 飯田, 長谷川, 藤田 他	電力系統におけるパワーエレクトロニクス応用機器適用の効果	電学電力・エネルギー部門大会	-	176	-	1992
93	5, 6	藤田 他	パワーエレクトロニクス応用機器の電力系統適用時の効果解析 (IV)	電学電力・エネルギー部門大会	-	246	90~91	1994
94	5, 6	佐藤, 塚田, 石塚, 小林	位相調整器を活用したループ系統の最適潮流制御	電学全国大会	-	1011	-	1986
95	4	古橋, 稲垣	大形変動負荷の最近の動向と設計・運用上の留意点	OHM	-	1	30~36	1977
96	4	松本	アンバランス負荷をもつ三相変圧器	電気計算	-	3	53~59	1986
97	5, 6	元治, 中村	高機能レギュレータネットワークシステムの開発検討	電学電力・エネルギー部門大会	-	241	-	1992
98		今井	パワーデバイス技術の現状と展望	電学B論解説	117	7号	899~900	1997
99		菅原	最近のパワーデバイスの進歩 SiCパワーデバイスの開発状況	電気学会誌	118	5	282~285	1998
100			電気工学ハンドブック	電気学会	-	-	-	-
101			電気回路理論	電気学会				
102			電力設備へのパワーエレクトロニクス技術の応用と将来動向	電気協同研究	54	6号		1999

本研究に関する発表論文

電気学会論文誌

1. 「不平衡補償機能付き自動式SVC制御方式の開発」
江口, 山本, 遠藤, 小西, 森田
電気学会論文誌D, 114巻4号, 平成6年
2. 「半導体化高速移相器による可変リアクタンス装置(系統事故時の保護機能)」
江口, 上村, 佐藤, 片山, 嶋田
電気学会論文誌B研究開発レター, 114巻11号, 平成6年
3. 「半導体化高速移相器による可変リアクタンス装置(電圧変動の補償)」
江口, 徳田, 上村, 平山, 嶋田
電気学会論文誌B, 116巻8号, 平成8年
4. 「直列形変換器と並列形変換器を組み合わせた電圧補償装置(機能と容量に関する検討)」
江口, 徳田, 嶋田
電気学会論文誌投稿, 査読中

国際会議

1. 「SVC CONTROL SYSTEM FOR ARC FURNACES」
Nakamori, Eguchi, Konishi, Endo, Yamamoto
IPEC-Yokohama' 95, Proceeding Vol 1, P.615 - P.620
2. 「Self-commutated SVC for Electric Railways」
Hirakawa, Eguchi, Ymamoto, Konishi, Makino
IEEE-PEDS' 95, Proceeding Vol 2, P.732 - P.737, 1995
3. 「Self-Commutated Static Flicker Compensator for Arc Furnaces」
Yoshioka, Konishi, Eguchi, Yamamoto, Endo, Mruyama, Hino
APEC' 96, Proceeding, P.891 - P.897, 1996
4. 「Series Power Line Compensator using a Self-commurtated Inverter」
Tokuda, Eguchi, Uemura, Shimada
PCC-Nagaoka'97, Proceeding Vol 1, P.203 - P.208, 1997

電気学会部門大会

1. 「不平衡補償機能付き自動式制御方式の開発」
森田, 山本, 小西, 江口
平成5年電学産業応用部門大会, 100
2. 「電気鉄道用静止形無効電力発生装置のミニモデルによる検証試験」
平川, 松浦, 江口, 山本, 小西, 馬場
平成6年電学産業応用部門大会, 190
3. 「電気鉄道用静止形無効電力発生装置の系統解析」
土井迫, 小森, 中森, 江口, 馬場
平成6年電学産業応用部門大会, 189
4. 「電流注入型可変直列コンデンサの原理と動作特性」
片山, 江口, 上村, 平山, 嶋田
平成6年電学産業応用部門大会, 95
5. 「半導体化移相器を用いた可変リアクタンス装置の不平衡電圧補償制御」
江口, 徳田, 上村, 平山, 嶋田
平成7年電学産業応用部門大会, 54
6. 「フリッカ補償用自動式無効電力補償装置の開発」
真野, 山本, 江口, 遠藤, 吉岡, 小西, 日野
平成7年電学産業応用部門大会, 190
7. 「自動式フリッカ補償装置のアナログシミュレーション」
丸山, 山本, 江口, 小西
平成7年電学産業応用部門大会, 191
8. 「電力系統用直列形電圧補償装置の制御方法と性能検証」
徳田, 江口, 上村, 嶋田
平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会 221

電気学会全国大会

1. 「不平衡機能付き自動式SVC制御方式の開発」
山本, 小西, 江口, 森田
平成5年電気学会全国大会, 604
2. 「系統連系用多重インバータ変圧器の直流過電圧現象の解析」
中森, 江口
平成6年電気学会全国大会, 552
3. 「半導体化移相器による可変リアクタンス装置の制御と電圧補償特性」
江口, 徳田, 上村, 片山, 平山, 嶋田
平成7年電気学会全国大会, 803
4. 「半導体化移相器による可変リアクタンス装置の電圧補償特性」
徳田, 江口, 上村, 平山, 嶋田
平成8年電気学会全国大会 849

5. 「高速大容量に適した系統連系インバータ」
中森, 吉岡, 江口, 中西
平成8年電気学会全国大会 8 4 8
6. 「自励式インバータを用いた直列形電力系統補償装置の保護方式」
徳田, 江口, 上村, 嶋田
平成9年電気学会全国大会 1 5 1 8
7. 「自励式直並列形電力系統補償装置の制御方法と性能検証」
徳田, 江口, 嶋田
平成10年電気学会全国大会 8 3 5

電気学会研究会

1. 「自励式直並列形系統電圧補償装置」
徳田, 江口, 嶋田
電力技術研究会, P E - 9 8 - 1 4, 1 9 9 8 年

その他

1. 「高性能自励式SVC」
江口, 加藤
電気評論, 1996年6月, P. 57~60
2. 「最近の製鋼用アーク炉」
江口, 宇都
富士時報, 1995年3月

謝辞

本研究を実施し、論文としてまとめるにあたり、まことに長期にわたって懇切なご指導と、終始温かい励ましを賜りました東京工業大学 嶋田隆一教授に心から厚く御礼申し上げます。

また、論文審査と研究の節目で貴重なご助言をいただきました、東京工業大学 深尾正名誉教授、片岡昭雄名誉教授、石井彰三教授、赤木泰文教授、高橋宏治助教授、佐藤之彦助教授、安岡康一助教授に深く御礼申し上げます。更に、実験のご協力や有益な討論を頂いた博士課程 上村敏氏（現 電力中央研究所勤務）、修士課程 片山靖氏（現 富士電機総合研究所勤務）、佐藤恵一氏（現 東京電力勤務）をはじめとする、嶋田研究室学生、研究生各位に深く感謝をいたします。

本研究は富士電機(株)及び(株)富士電機総合研究所皆様のご支援の賜であり、特に研究のきっかけを作っていただいた当時の富士電機総合研究所 中野孝良常務（現 芝浦工業大学教授）、原力本部長、井村輝夫部長に感謝いたします。また研究の環境を整備していただき、ご鞭撻頂いた、富士電機 高井明上席常務、富士電機テクノサーベイ(株) 黒木一男氏（元富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所長）、パワーエレクトロニクス研究所 海田英俊所長に感謝いたします。更に、研究全体にわたって実験と解析を補佐いただいた徳田寛和氏、貴重なデータやディスカッションに参加いただいた小西茂雄氏、山本光俊氏、篠原博氏、吉岡康哉氏、鈴木明夫氏、藤井幹介氏をはじめとする富士電機と富士電機総合研究所の関係各位に厚く御礼申し上げます。