直流送電技術と機器の高信頼度化

Trends of HVDC Technology—Highly Reliable Converting Equipment

我が国における直流送電は現在、比較的小容量の系統連系用として実用されており、その運転実績から交直変換システムの信頼度は世界水準を上廻る数値が立証されている。しかしこのシステムを将来大容量基幹送電用へ適用することを考えると、交直変換機器の一層の高信頼度化及び連系交流系統と協調をとった安定化制御技術の開発が望まれる。

日立製作所では関係する電力会社、研究所及び政府からの指導及び補助を得て、 直流送電関連技術開発を中心に多岐に亘るシステム関連技術及び高電圧・大容量化 を指向した変換機器の高信頼度化技術について開発を進めてきた。ここに、その成 果及び将来見通しを述べる。 村岡泰夫* Yasuo Muraoka
加藤 寧* Yasushi Katô
渡部篤美** Atsumi Watanabe
加納 孝*** Takashi Kanô
河合忠雄**** Tadao Kawai

11 緒 言

直流送電はこれまで主として比較的小容量の系統連系用又は原子力発電以外の電源送電用に適用されており、信頼度の評価も電源と同程度のアベイラビリティ(設備利用可能率)を基盤に考えられてきた。しかし、将来直流送電を原子力発電所からの大電力送電、あるいは常時大電力を流通させる系統間連系など、重要度の極めて高い系統へ適用することを考えるとシステム信頼度及び運転性能の一層の向上が必要である。この観点から、交直変換システム及び変換機器の技術レベルの見直しを行なった。システム面では、(1)系統解析手法の充実、(2)交直連系系統の安定化技術の確立、(3)原子力発電所との協調制御方式の開発、また変換機器の面ではなお一層の高信頼度化を指向した、(1)光直接点弧サイリスタバルブ、(2)新制御保護システムの開発を推進したのでこれらの技術的成果を中心に紹介する。

2 直流送電に関する最近の動向

2.1 直流送電設備容量の推移

電源立地面からの長距離大電力送電,あるいは電力の広域 運営及び安定供給面からの系統連系用に,直流送電が急速に 採用されてきている。CIGRE(国際電力技術会議)のSC14(直 流連系専門委員会)(1982年)席上での報告によれば1981年まで に世界で運転に入った直流送電設備(システム)は、図1に示 すように12.5GW/23個所である。更に建設中、又は計画が具 体化しているものが約32.5GW/25個所あり、1992年までには 総容量で約45GWが運転に入るものと見られている。

2.2 運転実績

CIGREの報告¹⁾によれば世界で現在運転中のサイリスタバルブを使用した変換所10個所の平均アベイラビリティが大略96%程度である中で、我が国の東京電力株式会社新信濃周波数変換設備及び電源開発株式会社北海道・本州間直流連系設備の値は共に99%前後となっている。

また,同報告中の運転不具合の内容の分析結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 使用不能となるシステム上の要因の80%弱が計画停止, 10%強が送電線, 10%弱が変換所の故障である。
- (2) 使用不能となる変換所の要因の60%弱が交流機器, 20%

が制御装置, 12%が直流機器(バルブ以外), 8%がバルブである。なお, 故障回数からみれば制御装置が最も多い。

我が国での実状は、上記の様相とは若干異なっているもののシステム信頼度上の技術開発は、上記の不具合要因を参考にして分析し、課題を明確にしたうえで重点指向すべきであろう。

2.3 基幹送電への適用

海外では大規模な長距離直流送電の建設が多く見受けられる。国内でも、昭和53年11月に発足したUHV送電特別委員会 (委員長 山田直平東大名誉教授)で技術的検討が行なわれている²⁾。すなわちUHV直流送電の原子力電源からの送電用、あるいは常時大電力を流通する系統間の連系用など重要度の高い系統への適用性が検討されている。このため交流送電と比較して優れた経済性が要求されるだけでなく、交流系統と協調をとって安定に運転する技術及び高い信頼性が要求される。

3 直流送電技術の開発

我が国では直流送電技術がこれまで系統連系用に適用されてきたため、万一何んらかの不具合が発生した場合にはシステムの運転停止に至ってもやむを得ないという考え方をとってきた。

しかし、将来の大容量電源の長距離送電を考えると、万一の直流送電系統の運転停止が系統に与える影響は図り知れないものであり、どのような場合であっても送電を継続し得るシステムが所望される。すなわち直流送電システムとしてはコンティンジェンシイ(偶発故障)に対する万全の策を講じておかなければならない。

このような観点から必要とされるシステム及び機器の「高信頼度化」、「高電圧・大容量化」などの技術開発の目標とそれを実現するための開発課題を図2に、またこれに対する日立の技術開発の取組み状況を図3に示す。

3.1 システム技術

3.1.1 シミュレーション解析技術

直流送電のシステム設計では送電容量,接続連系点,主回 路構成などが決まると,運転の安定性,過渡的な異常現象 (低次共振)の有無,VARバランス(直流送電電力の変化に伴 う所要無効電力の変動と無効電力補償容量とのバランス)と

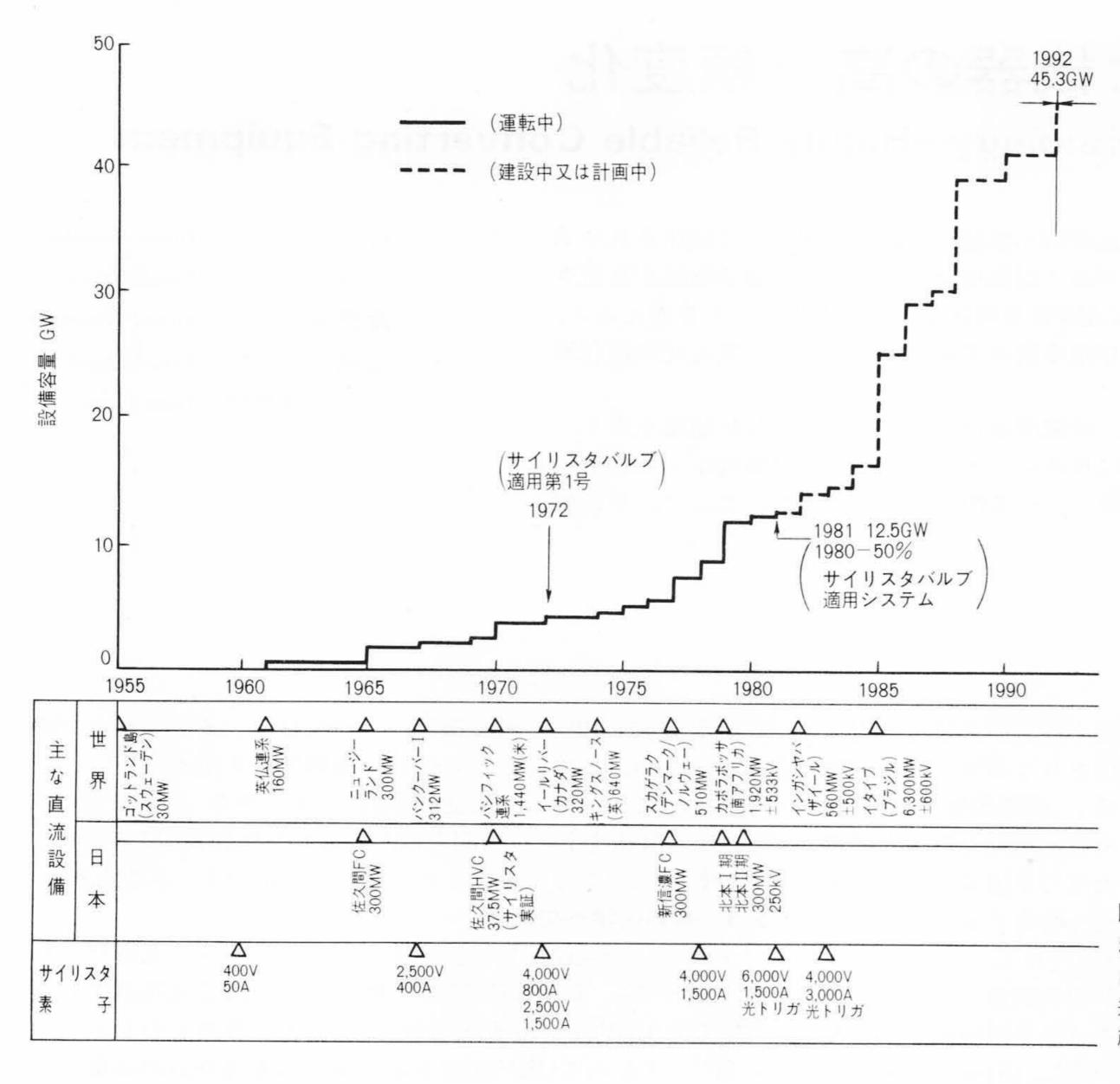


図 I 直流送電設備容量の推移(CIGRE SCI4-1982報告より) 1981年までに運転に入ったものは23個所12.5GW, 1992年までに運転に入ると見られるものまで累計すると49個所45.3GWに達する。

過渡過電圧の大きさ、雷、開閉インパルスなどのようなサージ性過電圧の大きさなどに関してシステム解析を行ない、系統に発生する諸現象を把握することが必要である。

直流送電システムの各種解析目的に対する日立のシミュレーション解析手法を図4に示す。最近BPA(米国ボンネビル

電力庁)から導入した解析プログラムのEMTP(Electro-Magnetic Transients Program)は、電気磁気回路の過渡現象を瞬時値で詳細に計算することが可能であり、交直連系系統の過渡安定度解析から雷インパルス領域の過電圧解析まで広域に適用できる新しい解析用ツールであり、日立製作所でもこ

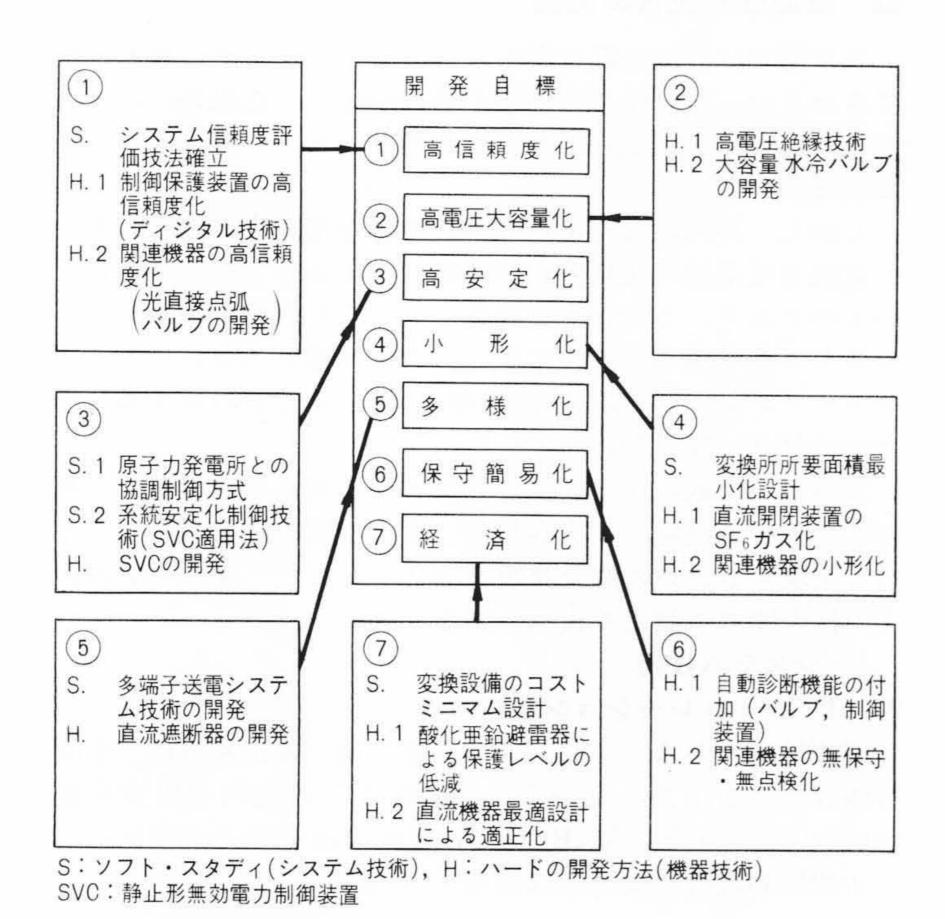


図2 直流送電技術の開発目標と課題 開発目標を達成するため、それぞれの項目毎にソフト面(システム技術)とハード面(機器技術)から取組んでいる課題を掲げている。

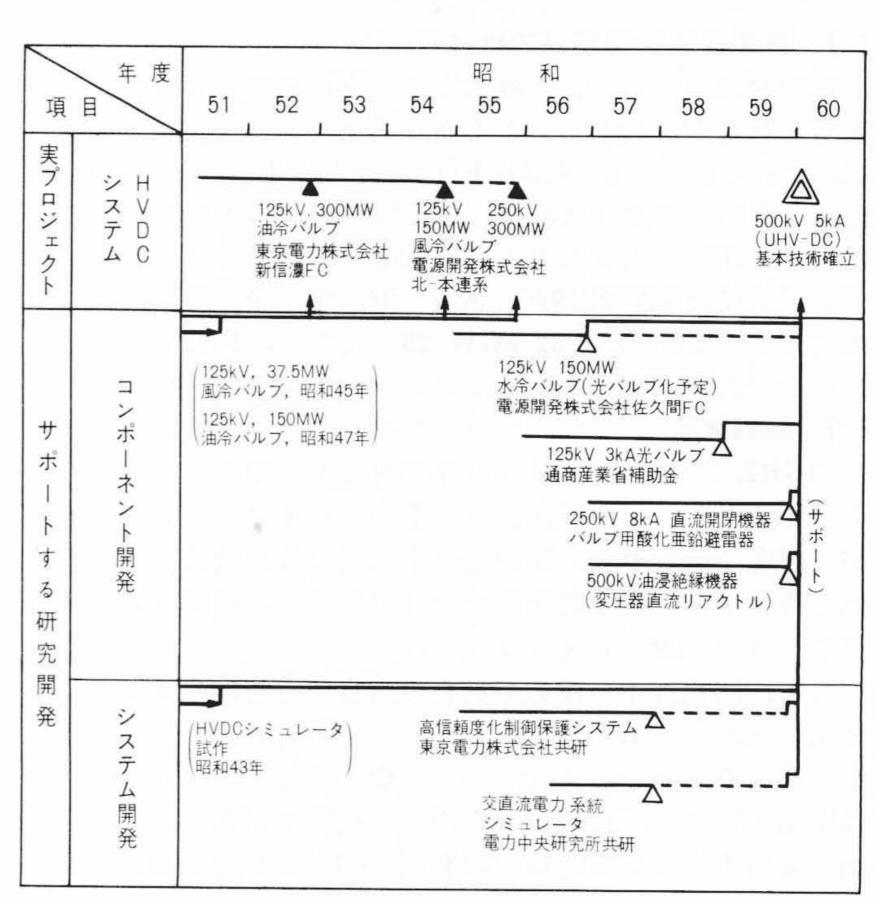


図3 日立における直流送電技術の開発動向 将来の基幹送電に適用可能な直流技術の確立を目指し、多くの委託研究、共同研究、自主研究が進められている。

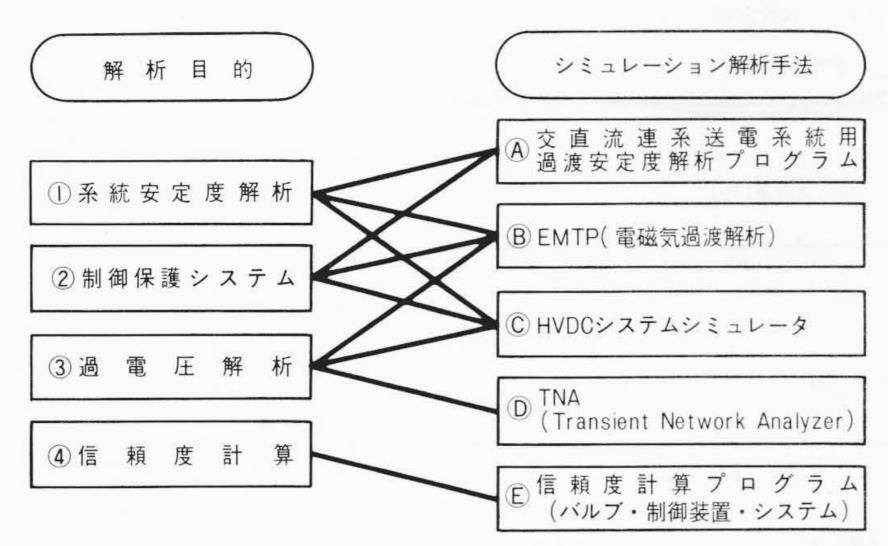


図 4 シミュレーション解析手法 直流送電システムの系統解析は事前に各種解析用ツールを有効に用いて実施される。

れを活用している。

解析手法のⓒ️Dはアナログ形の模擬装置であり、他のディジタル計算と併せて用いることにより、よりシミュレーションの信頼性が向上する。

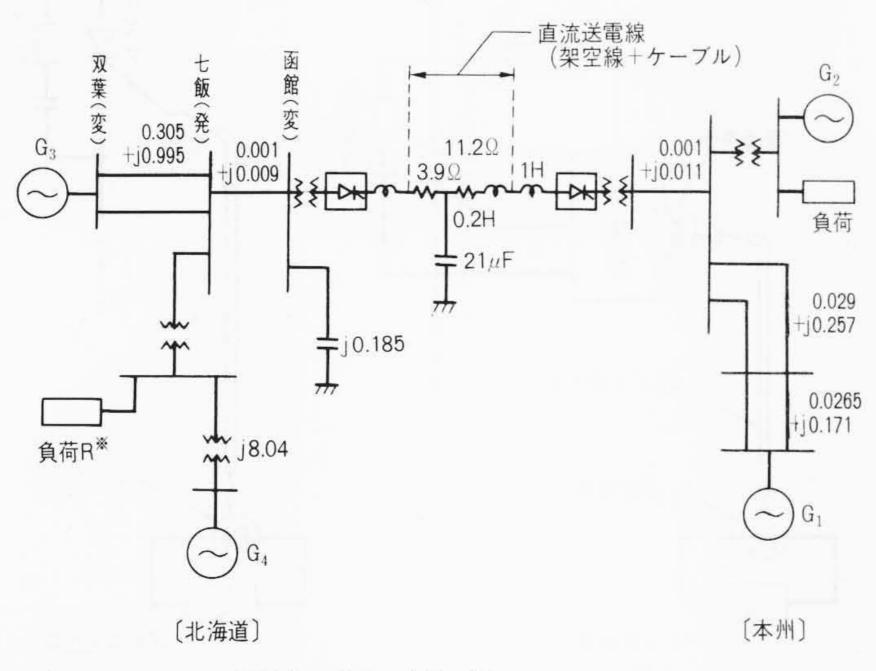
3.1.2 弱小交流系統に接続された直流系の安定運転3)

直流送電容量が比較的大きい場合,あるいは交流系統の末端で直流連系するような場合,すなわち相対的に交流系統の短絡容量の直流変換容量に対する比(SCR:Short Circuit Ratio=交流短絡容量MVA/交直変換容量MW)が小さくなる場合には安定運転を達成するため十分な配慮が必要である。

一般にSCRは、直流送電系統の運転で交流系と直流の制御系との相関による安定限界を示す指標として用いられており、この値が2.5以下程度となるようないわゆる弱い系統の場合には、SVC(静止形無効電力制御装置)適用などの対策が必要とされる場合が出てくる。

北海道・本州間直流連系ではこのSCRが2.8という厳しい 条件下であったが、制御方式と運用方式を工夫することによ り従来の無効電力補償設備で対応している。

図5は北海道・本州連系の系統図を示す。図6はこの系統について潮流計算を行ない、電圧安定度を検討した結果である。この検討条件の下では、ピーク負荷を考えると、常時は北海道から本州方向への送電電力は150MW以下に制限し、双



※(注) P_L=0.125p.u.(深夜)~0.248p.u.(ピーク) 1p.u.=1,000MVA, 187kV

図 5 北海道・本州連系系統図 過渡安定度解析(ディジタルシミュレーション)に用いた系統条件を示す。

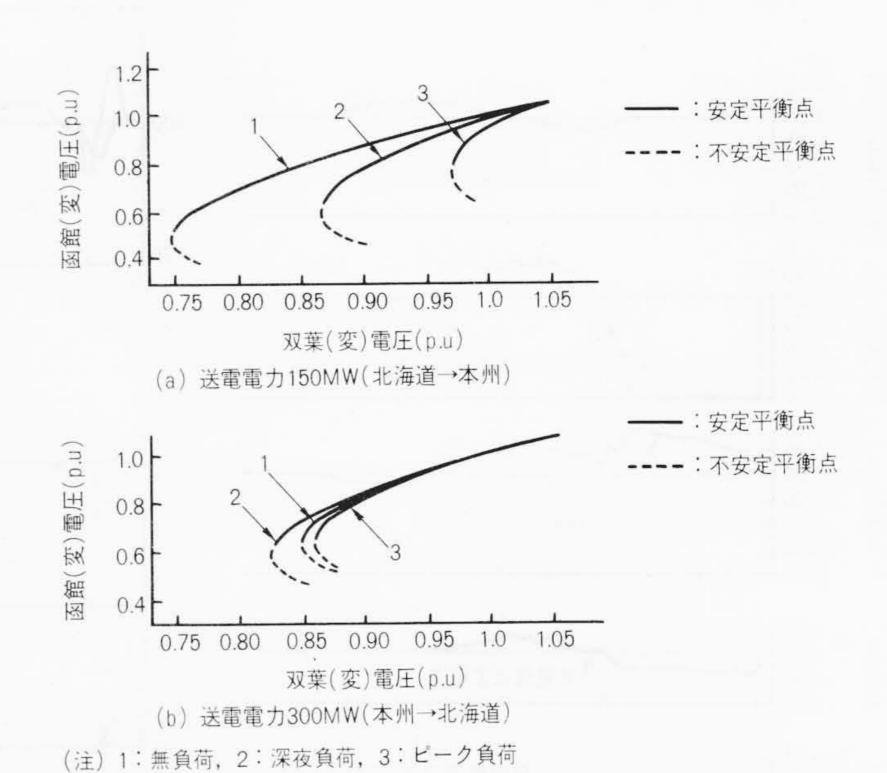


図 6 電圧安定度解析結果 北海道側の電圧安定性は交流系統の電圧が 高目な程安定となる傾向を示す。

葉変電所の電圧は定格値(1.0pu)よりも高目に設定しておく必要があることがわかる。

3.1.3 原子力発電所からの直流単独送電4)5)

大規模な原子力発電所からの電力を直流単独で送電するシステムを対象に、定常時及び送電線などの事故時における直流系の運転制御保護方式についてもシミュレーションによる種々の検討を実施した。これまでの検討では、直流系統双極2回線送電時の2極故障、交流系統における変換所近辺の3相短絡故障等の過酷な事故に対しても、原子炉をスクラムに至らしめることなく、運転を継続できる見通しが得られている。

図7は検討に用いた直流単独送電のモデル系統である。直流送電系統の電力制御速度は発電所の制御速度に比べて2~3けた速いので、発電量の制御を優先させ、直流送電量は正確にこれに追随させる方式をとっている。具体的には発電機の周波数を一定に保つ制御を行なうことによって、発電機の機械的入力(タービン出力)と電気的出力を平衡させる。

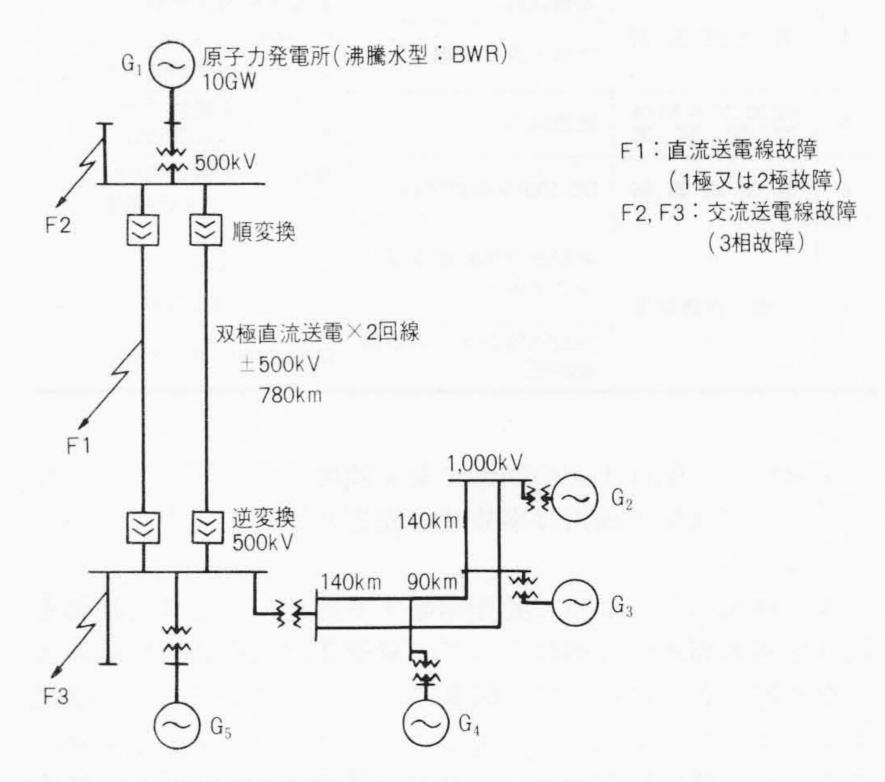
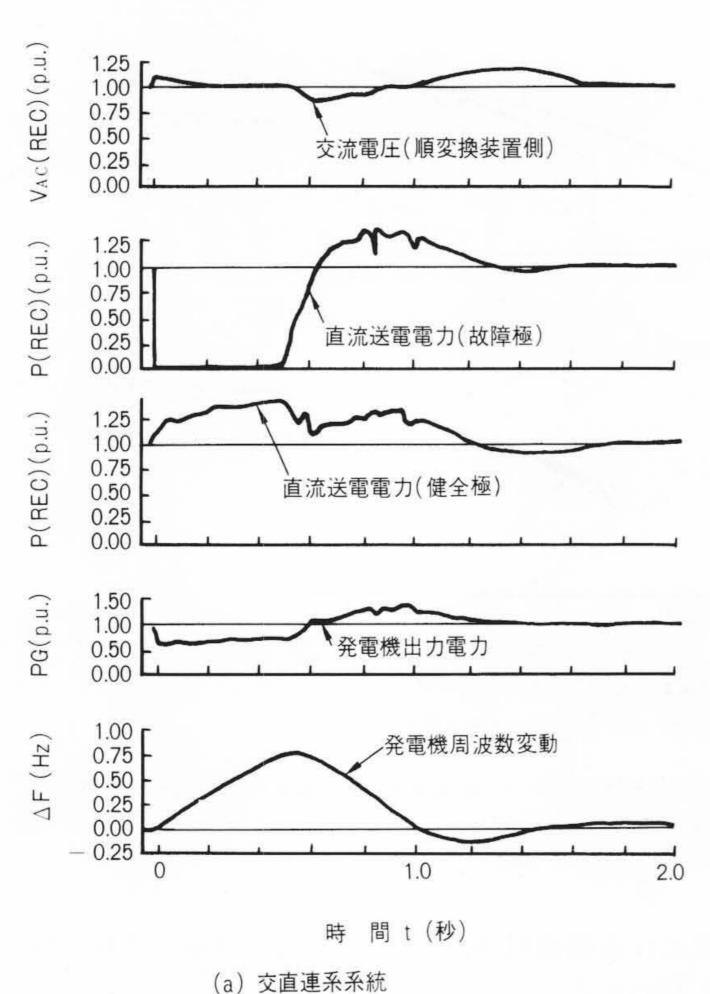


図 7 直流単独送電検討のためのモデル系統 ここでは10GWの原子力発電電力を双極2回線の直流送電線にて780km送電するとしたモデルである。



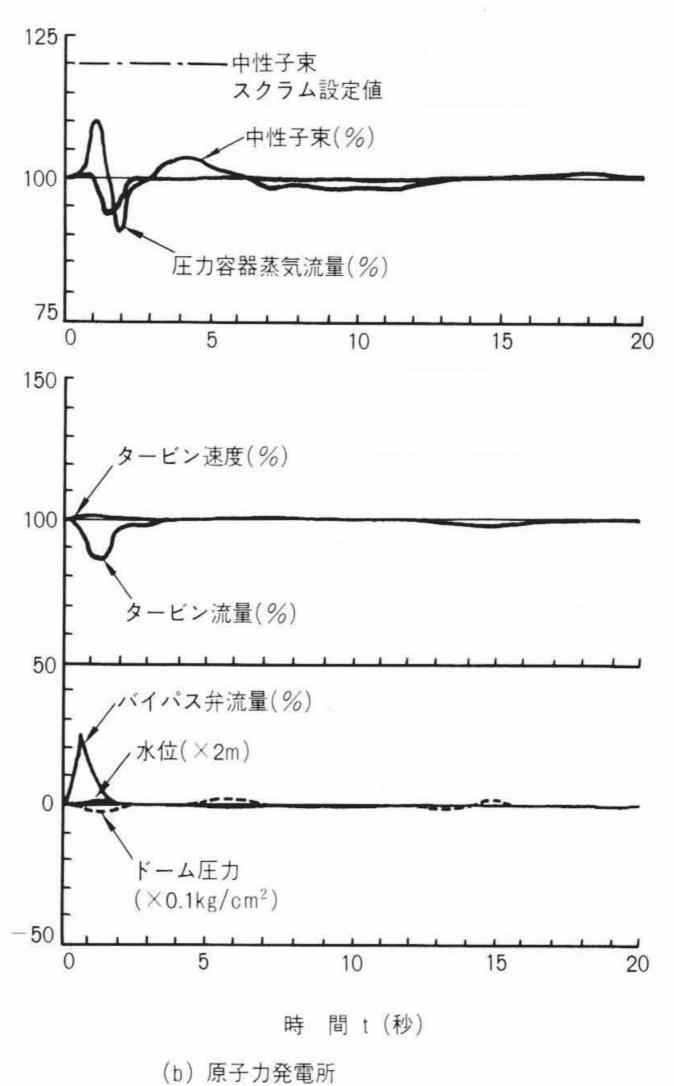


図 8 2極故障時の挙動(再 起動成功) 過酷な2極故障に 対し交直連系系統及び原子力発電 所はいづれも特に支障なく運転を 継続できている。

表 | 交直変換機器技術開発の概要 大電力基幹送電を指向した交直変換機器の技術開発項目と開発内容の概要を示す。

No.	品 目	開発項目	内 容
ı.	サイリスタバルブ	光直接点弧サイリスタ (4kV, 1.5~3kA)及 びバルブの実証試験	光直接点弧サイリスタ,発 光ダイオード,光ファイバ 系の製品試作
I.			光サイリスタバルブの試作 と信頼性実証試験
		大容量水冷バルブ	長期課通電試験
2	変 圧 器 直流リアクトル	DC 500kV 絶縁	直流絶縁の合理化
3	計器用変成器 (DCPT, DCCT)	光応用	I.0級光応用PCTの試作
	直流遮断器	要素試作	遮断部の要素試作
4		プロトタイプ器	DC 250kV, 8kA プロトタイプ器の試作試験
5	直流ガス絶縁開閉 装置	要素試作	スペーサ支持物の試作 断路器接地装置の試作
6	直流避雷器	DC 500kV用避雷器	酸化亜鉛形避雷器の試作 (ギャップレス化検討)
7	制御・保護装置	基幹送電用制御保護 システム	① 高信頼度 ② 原子力電源との協調 ③ 多端子直流送電システム
		直流送電システム信頼 度評価	信頼度解析手法の確立

平常時の運転は上記の制御で全く問題ないが、このような 送電系統の運転の成否は事故時の安定運転維持能力にかかっ ている。

故障検出信号によって動作開始する健全極の過負荷制御と高速応答の周波数制御によって,双極2回線中2極故障のような過酷な条件に対しても図8に示すように安定運転を継続することができる見通しを得ている。原子力プラントでは,このように数秒以内に収まる出力変動ではドーム圧力や水位の変化はわずかであり,最も問題となる中性子束でも図から

分かるようにスクラム設定値に対して十分な余裕があり支障 なく運転を継続できると考える。

3.2 交直流変換機器の技術開発

変換機器の技術開発の最大のねらいは高信頼度化である。 特に大きな技術進歩が期待できるサイリスタバルブと制御装置については、最近高信頼度化のうえで大きな成果が得られたので紹介する。

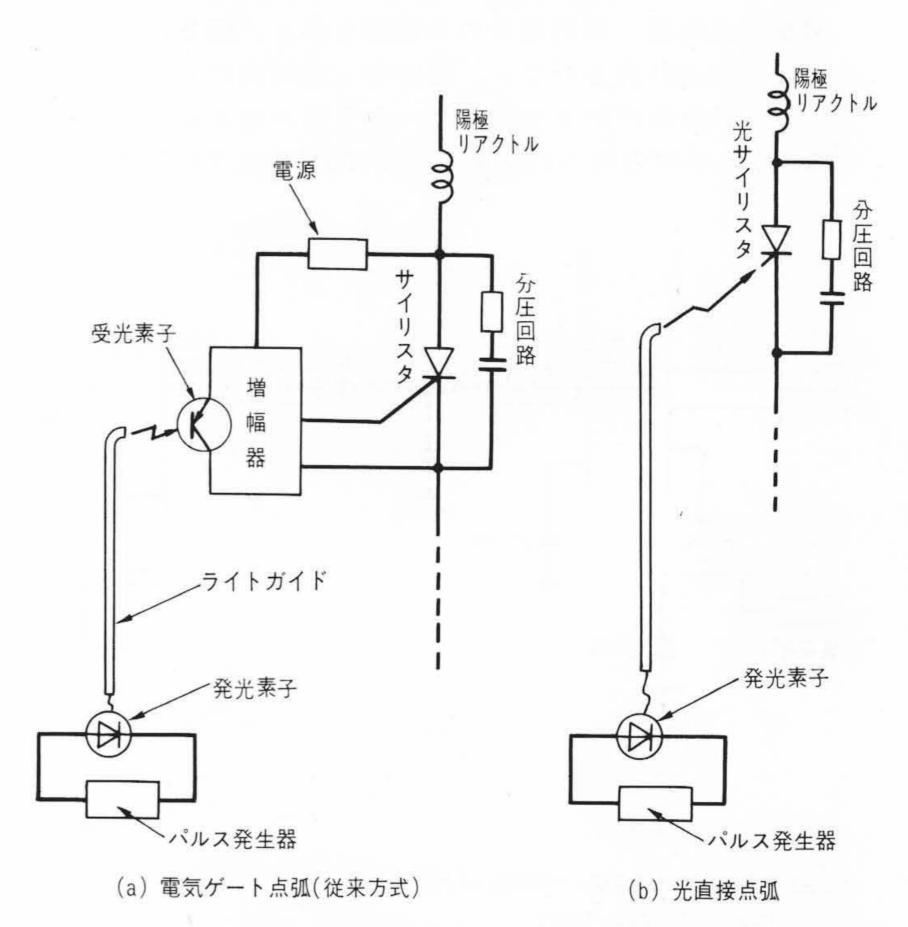


図 9 サイリスタゲート点弧方式の比較 光直接点弧方式では従来の電気ゲート点弧方式に比べて高電圧部にあったパルス増幅回路及びその電源が不要となる。

またその他の関連機器についても高信頼度化と高電圧・大 容量化を指向した研究開発を行なっている。これらの概要を まとめて**表1**に示す⁶⁾。

3.2.1 光直接点弧サイリスタバルブ7)

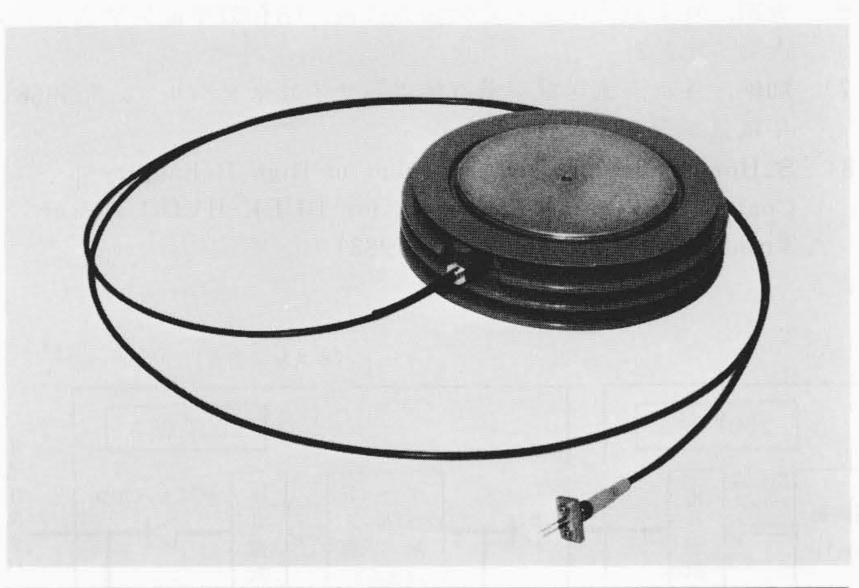
光直接点弧サイリスタバルブ(光サイリスタバルブと略称) は図9に示すように大地電位にある発光素子(LED)からの信 号で主サイリスタを直接点弧させるもので、従来の電気ゲー ト点弧方式のバルブに比べて点弧用パルス増幅回路が不要で あり、部品点数の大幅削減や装置の小形化が可能となる。ま た、電気ノイズに影響されないため信頼性は一段と向上する。 光サイリスタバルブの主要構成部品である4kV, 3,000A光 直接点弧サイリスタ素子, 1W級高出力LED, 光ファイバを 組み合わせたものを図10に示す。光直接点弧サイリスタ素子 では,点弧用光信号に対する最小感度と外部から印加される 急しゅんな立ち上がりの電圧変化に対する耐量とが相反する 要求性能であるため,これらの最適妥協点をとることにより 十分量産性のある素子の開発を行なった。

発光素子では高出力化と光を光ファイバへ結合する効率を 良くすることが重要である。集光部の形状を通常の球形から ワイアストラス構造に変更することにより指向性を向上させ, 前方向の光出力を図11に示すように従来品の約1.5倍に増加さ せることができた。

上記の光点弧系のほか冷却系については直接水冷却方式の 開発を進めており、絶縁構造については「空気」「油「SF6ガ ス」などの各方式について十分な評価ができるよう基礎デー タを積み上げ、開発を進めている。

3.2.2 制御保護装置8)

サイリスタバルブは制御装置から常に点弧信号を受けるこ



	項目	仕 様
	繰返しピークオン電圧	4,000V
	繰返しピーク逆電圧	4,000V
	定格平均オン電流	3,000A
W 44 7 11 3 4	臨界オン電流比率	300A/μs
光サイリスタ	臨界オフ電圧比率	2,000V/μs
	最小点弧光入力	I Om W
	熱抵抗	0.0085℃/W
	シリコンウエーハ呼称径	100mm
	材質	Ga Al As
	出力	1,000mW
発光ダイオード	電気入力	3.5A
	形状	ドーム整形
	ドーム直径	900µm

図10 4 kV, 3,000A光直接点弧サイリスタと I W発光ダイオード IW発光ダイオードから出力した光点弧信号はバンドル形光ファイバを通過し て光サイリスタの側面よりパッケージ中心部のゲートへと導かれる。

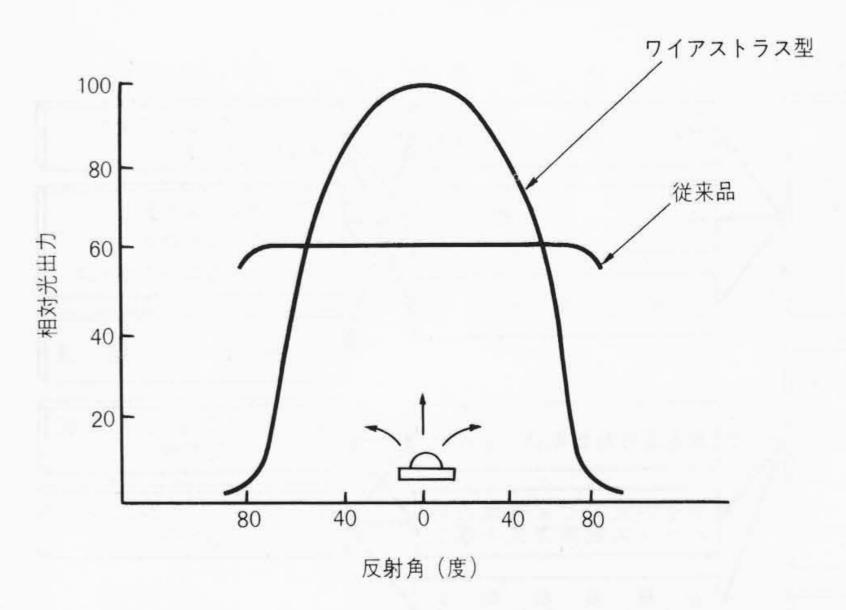
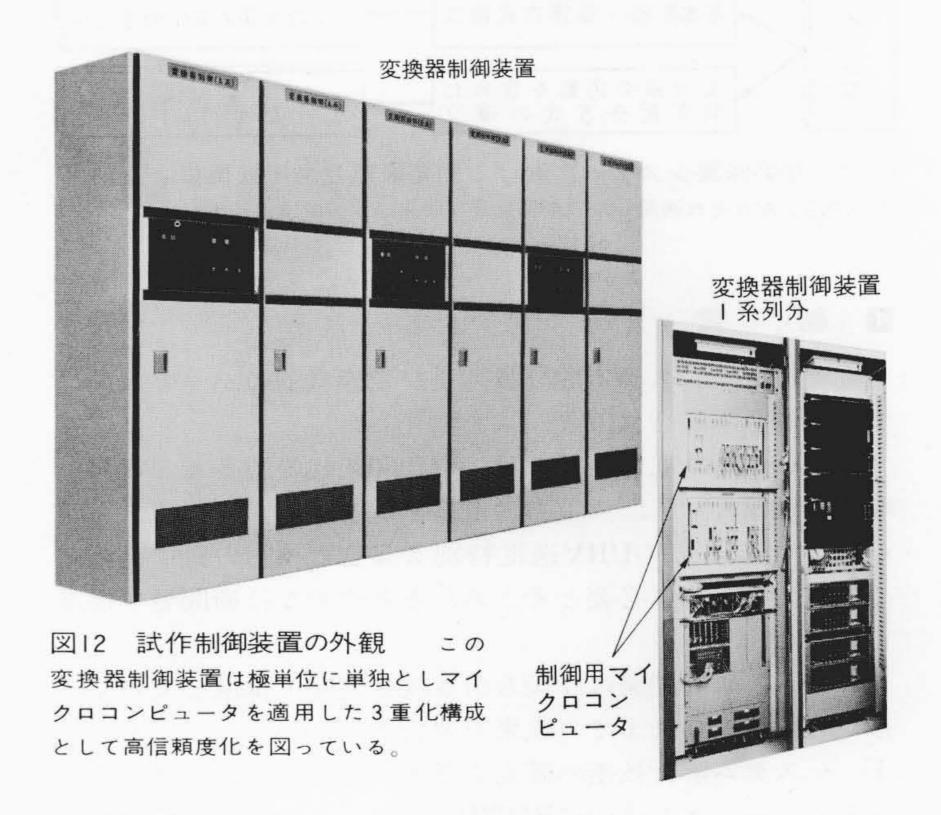


図 ロワイアストラス型の指向特性 発光ダイオードの光出力を効率 よく光ファイバに結合できるように, 光出力の前方向の指向性を向上させた。



とによって運転されている。したがって制御装置の故障はそ のままシステム全停に進展することになるため、制御保護装 置には高い信頼性が要求される。そこで大電力基幹送電系統 へ適用可能な直流送電用制御保護システムの技術開発につい て昭和55年7月より東京電力株式会社と共同研究を実施した。 主として(1)制御保護システムの高信頼度化,(2)原子力発電 所との協調制御方式の確立,及び(3)多端子直流送電制御保護 技術の確立,の3つの課題についての検証試験が行なえるよ うに図12に示す試作装置を完成した。

それぞれの課題を解決するために適用した技術とその効果 を取りまとめて図13に示す。今回特に力を入れた開発課題で ある高信頼度化については、(1)回路の多重化構成、(2)高信頼 度部品の採用、(3)自動監視の適用などの方策を採用した。

多重化については各種信頼度計算を行なった結果,図14に 示す3重化構成を採用し、万一、一つの系が故障停止しても 運転状態には影響を与えず、残りの2系による制御に切換わ り安定な運転を継続できるようにしている。また、今回の試 作装置では系統制御装置,変換器制御装置ともマイクロコン ピュータを使用したディジタル制御を採用することにより, 上記の冗長系を容易に構成できるようにした。

昭和57年度に日立製作所研究所のHVDCシミュレータと組 み合わせて一連の検証試験を実施し所期の性能を確認した⁸⁾。

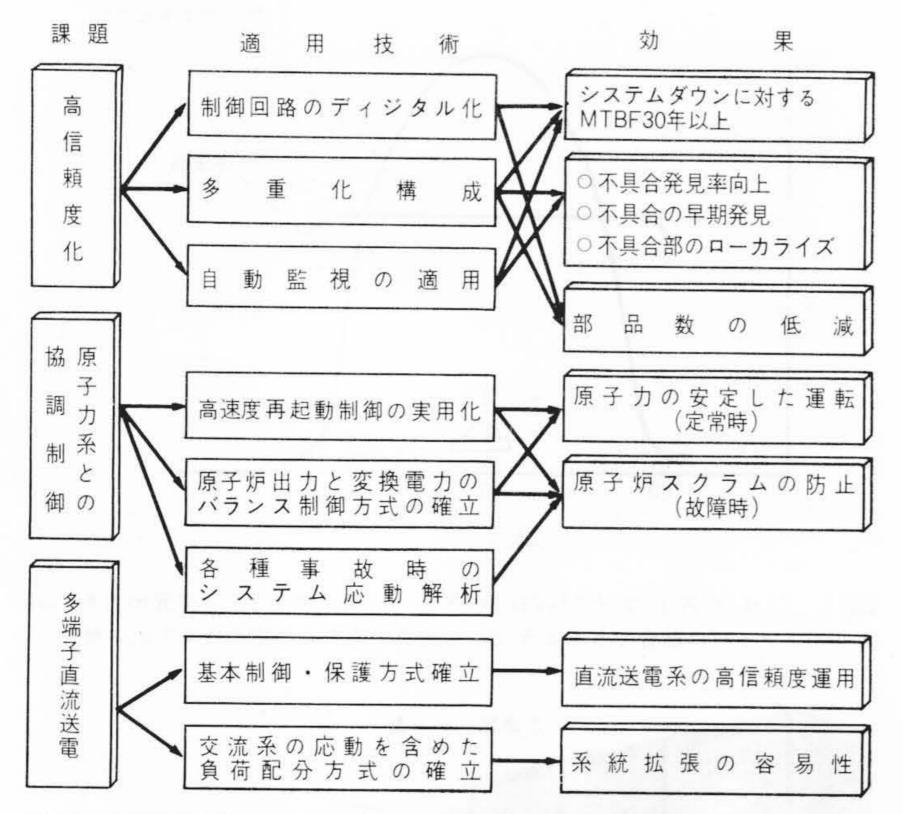


図13 制御保護システムにおける開発課題と適用技術による効果 3大課題とそれぞれ適用した技術開発及び適用効果の関連を示す。

4 結 言

直流送電のシステム設計技術及び変換機器のハード技術について最近の開発状況の一端を紹介した。

「UHV直流送電については、昭和60年代のできるだけ早い時期を目標として、大電力送電に直流を適用する可能性を明らかにする。」とのUHV送電特別委員会の検討方針に沿い、この検討のために必要と考えられる基礎的な技術開発を推進してきた。

これらの研究開発は今後も引き続き展開・推進していく所 存であるが、これまでの成果を要約すれば

(1) システム解析技術の確立:従来のアナログ, ディジタルシミュレーション技術にEMTPを加え, より詳細な模擬が可能となった。

- (2) 連系系統安定化技術の確立:直流送電容量に対して相対的に交流系統短絡容量が小さい場合の直流制御系の最適化技術を確立し、更にSVCの設置などのシステム構成まで加味した安定化技法の基本を確立した。
- (3) 光サイリスタバルブの開発: 4kV, 3,000A光直接点弧サイリスタ, 1W級発光ダイオードなどを開発し、サイリスタバルブの性能評価を進めることができた。
- (4) 高信頼度制御保護装置の開発:マイクロコンピュータを 使用した3重化構成により、装置の高信頼度化を実証した。

今後共上記開発技術の検証を更に進めるとともに,システムとしての信頼度評価,経済性評価などを進めてゆきたい。

終わりに臨み,これらの技術開発に多大な御援助と御指導を賜った通商産業省,東京電力株式会社,電源開発株式会社, 財団法人電力中央研究所及びその他の関係各位に対し心から お礼申しあげる次第である。

参考文献

- J. Knudsen et al: "A Survey of The Reliability of HVDC Systems Throughout The World During 1979– 1980" CIGRE 14-06(1982)
- 2) 山田, 外:UHV交流送電 電気学会雑誌 102·11 P.969 ~1051(昭57年)
- 3) T. Senda et al: "Prevention of Voltage Instability in Hokkaido-Honshu HVDC Link" CIGRE SC14(1981)
- 4) T. Sakurai et al: "Cooperative Control Scheme for an HVDC System Connected to an Isolated BWR Nuclear Power Plant" IEEE PES Winter meeting (1983)
- 5) T. Sakurai et al: "Analysis of Dynamic Performance of HVDC Transmission System Connected to BWR Nuclear Power Plant" CIGRE SC14(1982)
- 6) 専田, 外:直流送電用変換装置技術, 昭和57年電気学会全国 大会 S.7-2
- 7) 加納,外:直流送電用光直接点弧サイリスタバルブ,昭和58 年電気学会全国大会 S.3-6
- 8) S. Horiuchi et al: "Development of High-Reliability Control/Protection Equipment for BULK-HVDC Power Transmission" IPEC-Tokyo(1983)

