

ヒューズフリーしゃ断器を主体とする 電路保護協調システム

Study of Protective Coordination System by Fuse-Free Breakers

電力需用の増大に伴い、大短絡故障電流の経済的な処理、電力供給の安定信頼度に対する要求などが高度化し、電路の保護協調が大きな問題となってきた。

これに対処するため、ヒューズフリーしゃ断器どうしによるカスケードしゃ断、及び選択しゃ断協調における電路保護要件について検討し、それらに必要、且つ有効な限流形しゃ断器、小形高性能しゃ断器及び三元特性しゃ断器の機種整備を行ない、それらの組合せについて実験、検討を重ね、電路保護協調システムを構成するための実用的なデータが得られた。

鈴木 浩* Hiroshi Suzuki

橋爪正興* Masaoki Hashizume

1 緒言

近年、ヒューズフリーしゃ断器（Fuse-Free Breaker以下、FFBと略す）は、低圧電路保護器の主力機器として大きくクローズアップされてきており、量的には着実な伸びを示し、また技術面では電源設備の大形化に対処して、大容量化と高しゃ断容量化を主体とした研究開発が行なわれた。この結果、従来の気中しゃ断器（Air Circuit Breaker以下、ACBと略す）の分野への進出を図った4,000Aフレームのような大容量機種の開発、大幅な高しゃ断容量化を可能にした限流形FFBの出現などがあり、電源の大形化に対処した要求はほぼ満たされてきた。

しかし、電力需用の増大は単に機器の大容量化、高しゃ断容量化だけではなく、電力供給の信頼性に対する要求などが高度化し、特に電路の保護協調が大きな問題となってきた。

その要件としては次のようなものがある。

- (1) 大きな短絡電流を経済的に処理するためのFFBどうしのカスケードしゃ断協調
- (2) 連続給電を確保するためのFFBどうしの選択しゃ断協調
- (3) 下位電磁開閉器とのコンビネーション協調
- (4) 地絡保護

この保護協調は、いわば一つのシステムとしての価値を求め、単に個々の機器の信頼性が十分でもその構成しただけでは、所期の目的を達することができないといった場合も十分起こり得るわけである。

それゆえに、この保護システムを効果あるものにするためには、そのかなめとなるFFBの使い方が重要になってくる。

この論文では、FFBどうしの保護協調についてだけを記述し、(3)、(4)項については別の機会に譲る。

2 短絡保護の概念と限流しゃ断の必要性

前項に記述した要件のいずれの場合も、回路の短絡保護とは、単に回路の短絡電流をしゃ断できる能力をもつ保護器を設けるだけでは十分でない。

FFBの高しゃ断容量化は、必要条件の一つではあるがすべてではなく、たとえFFBが短絡故障時の大電流を処理できたとしても、その回路にある機器や電路の損傷が著しくは無意味となる。

すなわち、FFBが大電流をしゃ断する際、通過させる電流の大きさは、電路中にある電線や直列機器の短絡電流強度を超えないように保護協調をとることが必要である。

しかし、電源の大形化による事故時の短絡電流の増大は著しく、一方、電路や機器がFFBのしゃ断時間の間耐えられる短絡電流の大きさには限度があることから、大容量電源設備の短絡保護は限流しゃ断が欠くことのできない条件となる。

限流しゃ断とは、図1に示すように事故時の大電流をそのまま処理せずに、なんらかの方法により小さな値に制限して処理することで、しゃ断時の回路や直列機器に与える熱的・電磁的衝撃を軽減できるという点に大きな意義がある。

図2に電磁反発力を応用した限流形FFBの構造を、図3に標準形FFBとの限流特性の比較を示す。

3 カスケードしゃ断協調

昭和48年2月、電気設備の技術基準が改正され、カスケードしゃ断方式の採用が正式に認められることになった。

カスケードしゃ断方式とは、図4(a)に示すような回路において、CB₂単独ではA点の短絡事故に対ししゃ断容量が不足であるが、上位CB₁のバックアップによりこれを補う構成で、経済性の得られる保護方式である。

カスケードしゃ断の原理は、図4に示すような直列回路において同性能の2台のFFBが同時にしゃ断したとすれば、それぞれのFFBの発生アークエネルギーは次のようになる。

CB₁のアークエネルギーE₁は、

$$E_1 = \int_{t_a}^{t_c} v_1 i dt \dots\dots\dots(1)$$

CB₂のアークエネルギーE₂は、

$$E_2 = \int_{t_a=t_b}^{t_c} v_2 i dt \dots\dots\dots(2)$$

ここでE₁+E₂は、ほぼ回路の短絡エネルギーにより決まるもので一定と考えられ、もし、2台のFFBが平等にアークエネルギーを分担するとすれば、理論的にはE₁≒E₂となり、2倍のしゃ断能力をもつことになる。

つまり、CB₁及びCB₂のアーク電圧を重畳させてやること

* 日立製作所中条工場

により、通過電流ピーク値 I_p 及び通過エネルギー $I^2 \cdot t$ を低減させてやり、しゃ断を容易にすることで $E_1 > E_2$ とすることが望ましい。

しかし、一般には上位FFBと下位FFBでは、上位FFBのほうが大形であり、しゃ断動作も遅く、従ってアークの発生も遅いことにより完全にアーク電圧が重畳されないため、それぞれのFFBのアークエネルギーの分担比率は $E_1 < E_2$ となる。

つまり、下位FFBのアークエネルギー分担が多くなり、カスケード効果が減少することになる。

カスケードしゃ断では、この下位FFBの分担比率を極力軽減してやることが上位バックアップFFBの任務となる。

ここで、しゃ断容量を超えた短絡電流に対するFFBの破損を考えてみると、しゃ断時の通過 $I^2 \cdot t$ で表わされる熱的衝撃による導体などの溶融・溶断、発生アークエネルギーによる内圧上昇のためのケース、カバーの破壊及び通過電流ピーク値 I_p による電磁的衝撃のための各部の破損などがある。

このことから、カスケードしゃ断協調が成立するためには、次のような条件が必要である。

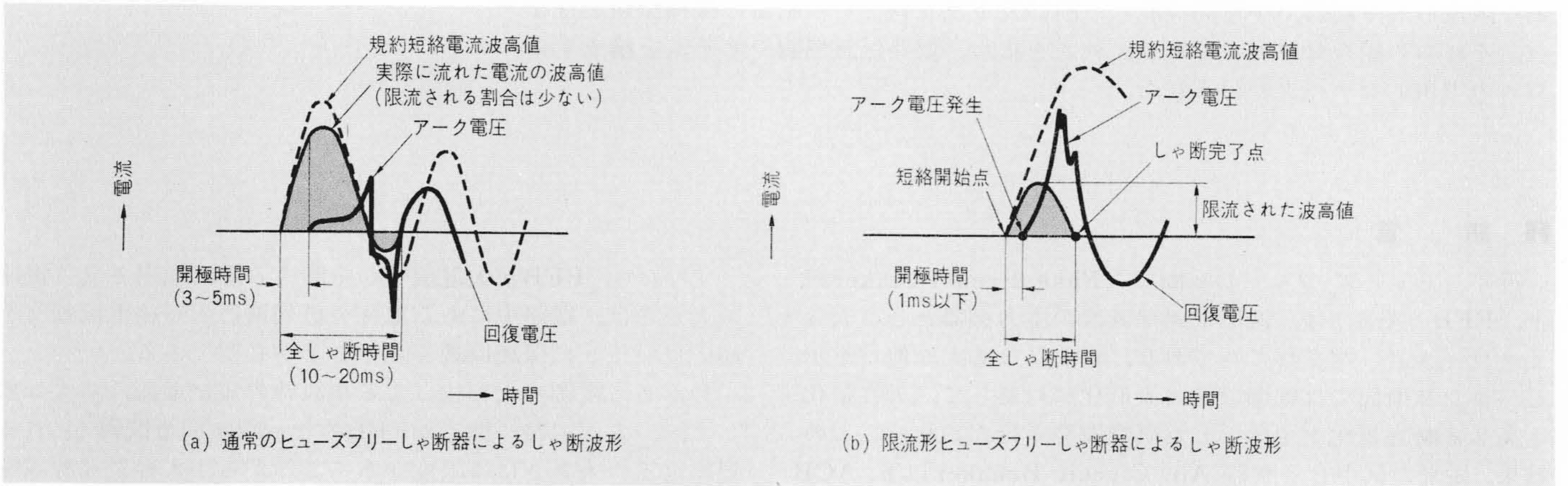


図1 限流しゃ断の原理 限流形FFBは通常のFFBに比べ、限流波高値を低い値に制限できる。

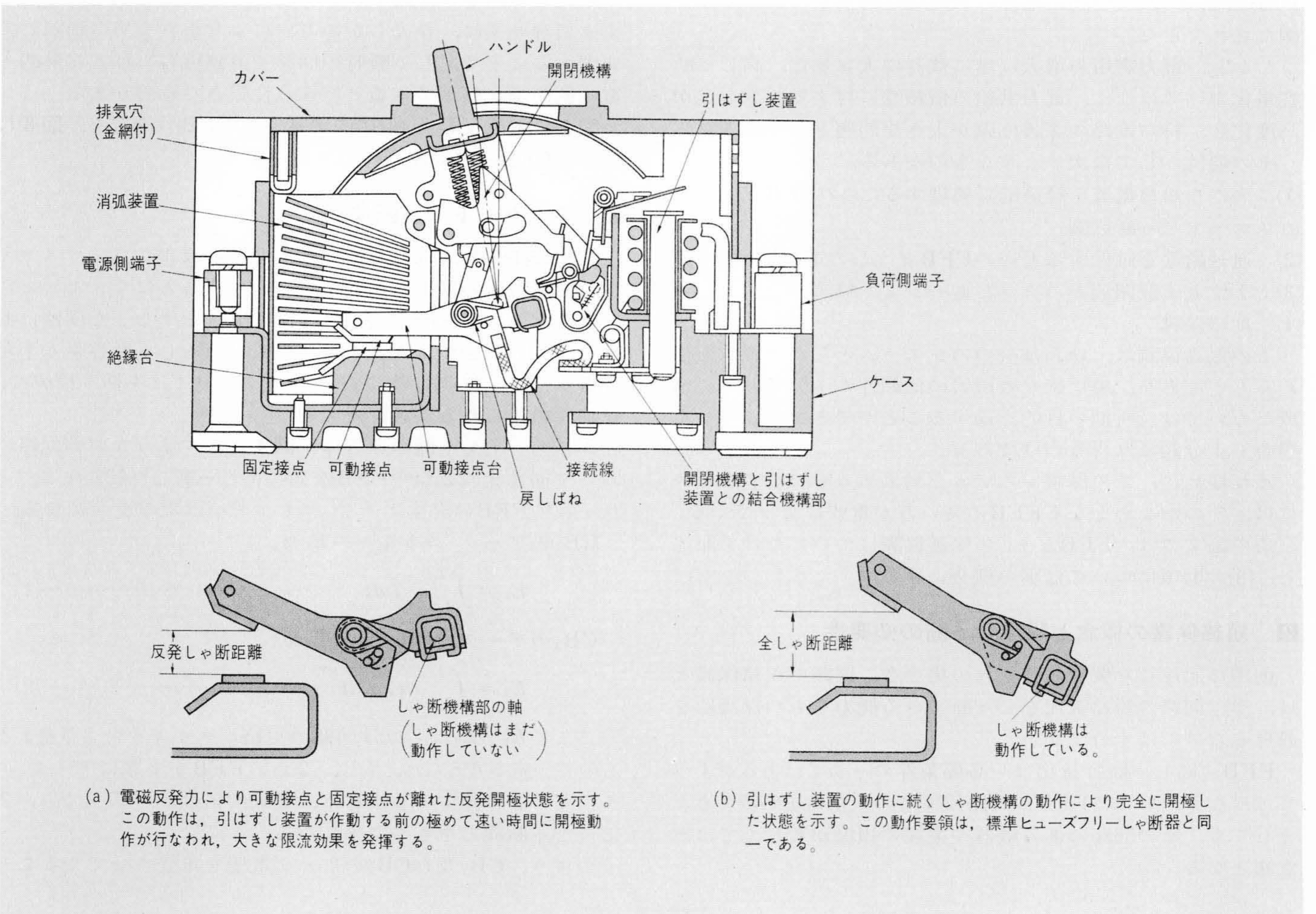


図2 限流形FFBの構造(L-100フレームの例) 電磁反発力を応用した高速開極による限流効果がねらいである。

- (1) しゃ断時のしゃ断電流ピーク値が、CB₂の機械的強度以下であること。
- (2) しゃ断時の通過 $I^2 \cdot t$ がCB₂の熱的強度以下であること。
- (3) CB₂の発生エネルギーが各部の耐エネルギー強度以下であること。

従って、上位バックアップ用FFBとしては、開極時間が早く、アーク電圧も高く、限流特性の良い限流形FFBが有利なことは明らかであり、カスケードしゃ断システムとしては、LシリーズFFBを軸に構成するのがよい。

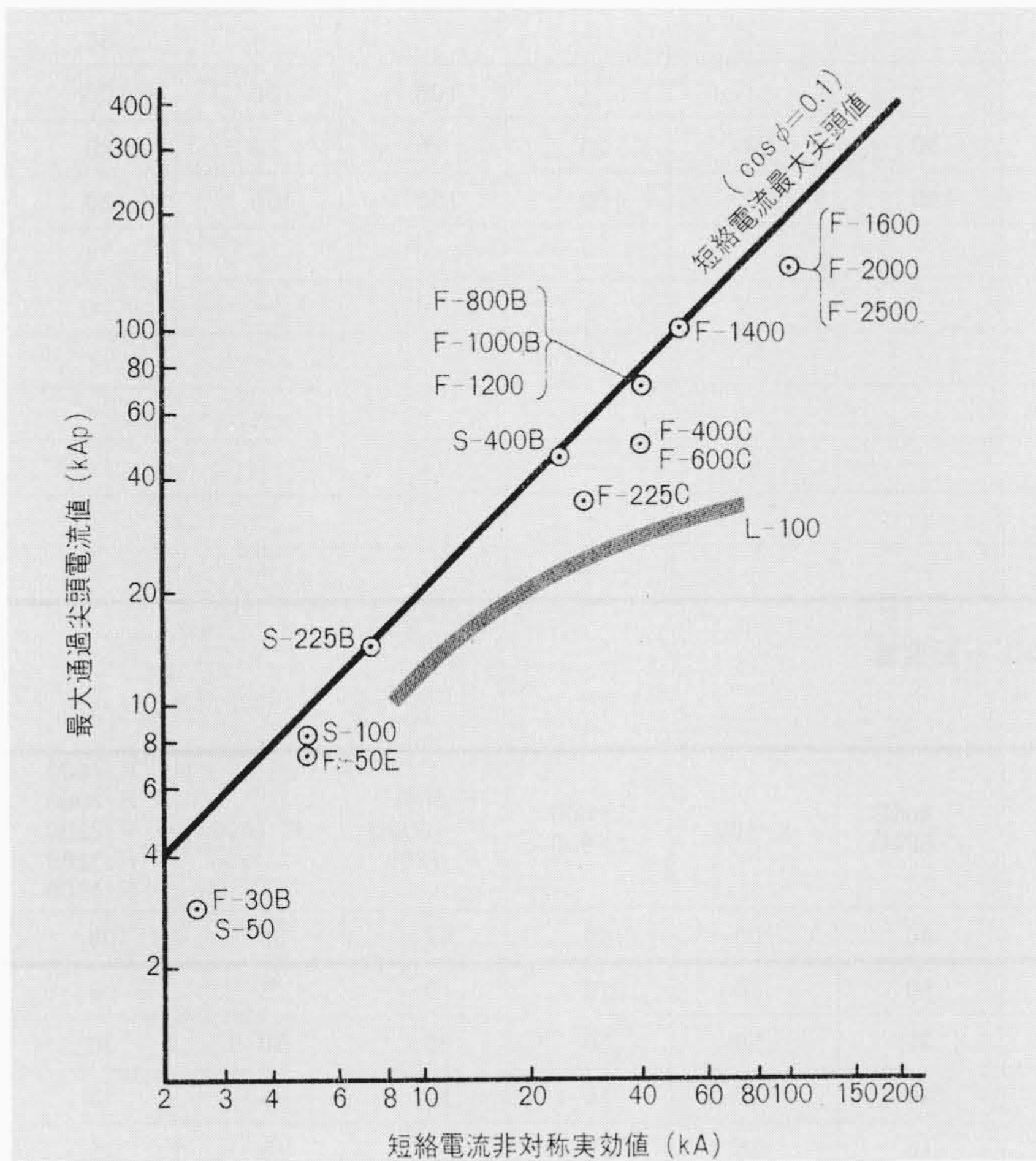


図3 400V級しゃ断限流特性の比較例 限流形FFB(L-100フレーム)は、定格しゃ断容量近辺におけるしゃ断では標準FFBに比べ、通過電流尖頭値を約1/4に軽減できる。

また、被バックアップ用の小形FFBは、しゃ断能力はあまり大きくする必要はないが、ケース、カバーの機械的強度を増すことが必要である。

表1はこのような点を考慮して最近開発された新機種と、これに対応する従来機種とのケース、カバーのしゃ断時における衝撃強度比較を示す。

以上のようなFFBの総合的改良の結果より得られたFFBどうしのカスケードしゃ断協調範囲は、大幅に拡大された。

図5にカスケードしゃ断時のオシログラムの一例を、表2にFFBどうしのカスケードしゃ断協調特性を示すが、その目的とする安全性と経済性の得られる組合せが決定できた。

4 選択しゃ断協調

選択しゃ断協調とは図6に示すような回路において、A点で短絡事故を生じた場合、この点にいちばん近い分岐しゃ断器CB₂だけが動作して事故回路を切り離し、主しゃ断器CB₁はしゃ断動作に至らず、従って他の健全回路CB₃、CB₄などへの事故波及を防ぎ、停電範囲を最小限にとどめることが可

表1 小容量FFBの短絡しゃ断におけるケース、カバーの破壊強度限界 新機種では、しゃ断能力限界決定要因の一つとなるケース、カバーの破壊強度が増大され、特に被バックアップ能力が大幅に向上した。

従来機種のフレーム名	新機種のフレーム名	破壊限界通過電流ピーク値の比較 (%) (新機種 / 従来機種 × 100)
F-30	F-30B	140
F-50C	S-50	"
F-50B	F-50E	200
F-50G	"	180
—	L-50	F-50Bとの比較 300
S-100	S-100C	180
F-100C	F-100E	260

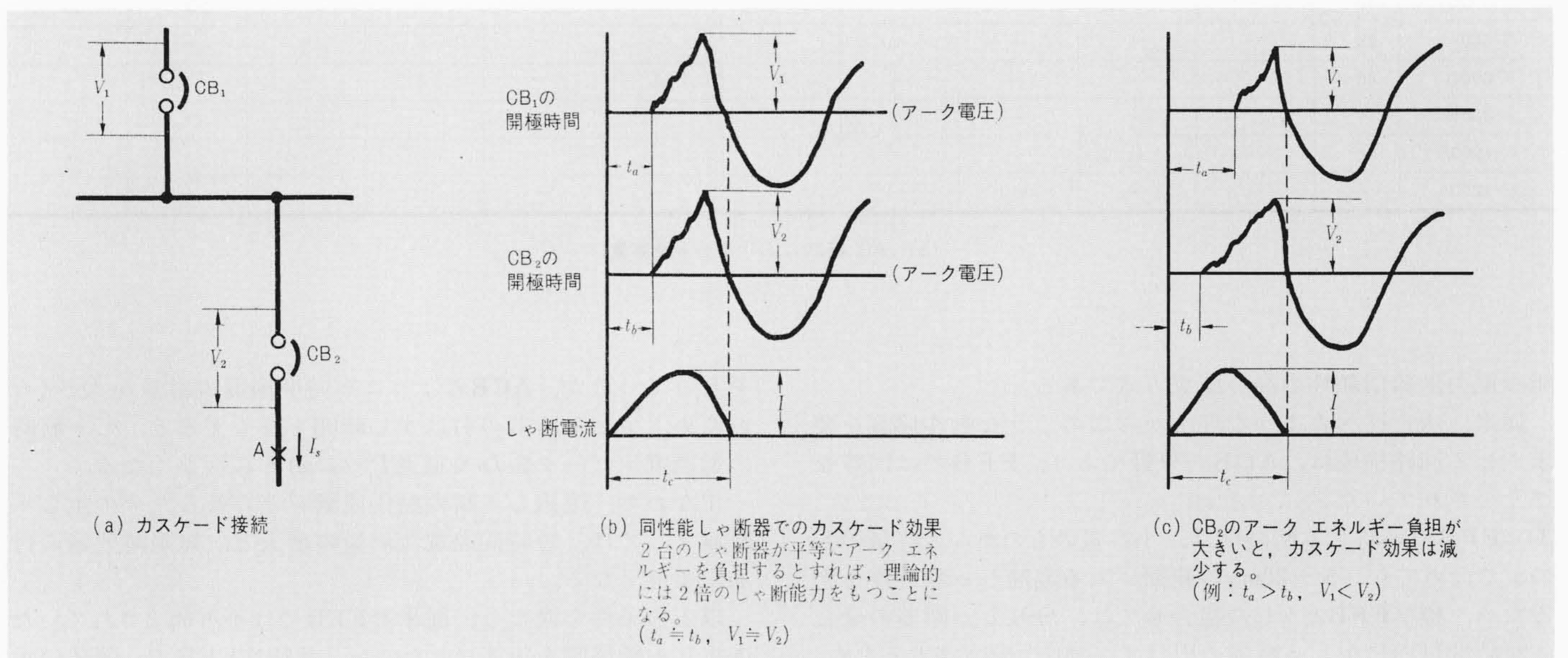


図4 カスケードしゃ断の原理 カスケード効果は被バックアップしゃ断器のアークエネルギー負担をできるだけ小さくすることにある。

表2 FFBどうしのカスケードしゃ断容量 カスケードしゃ断の採用により実質上のしゃ断容量のupが図れる。

下位FFB しゃ断容量 (kA)	上位FFB しゃ断容量 (kA)	F-100C	F-100E	L-100	F-225C	L-225	F-400C F-600C	L-400	L-600 L-800	F-800B F-1000B F-1200	F-1400	F-1600 F-2000 F-2500 F-3200 F-4000
		20	100	200	100	200	100	200	200	100	100	150
F-30B	2.5	20	50	50	7.5	7.5	7.5	7.5	2.5	2.5	2.5	2.5
S-50	5	"	"	"	"	"	"	"	7.5	7.5	5	5
F-50E	10	"	100	100	100	100	100	100	100	50	50	10
L-50	100	—	"	"	"	"	"	"	"	100	100	100
S-100C	10	—	—	—	"	"	"	"	"	50	50	10
F-100C	20	—	—	—	"	"	"	"	"	"	"	50
F-100E	100	—	—	—	"	"	"	"	"	100	100	100
S-225B	15	—	—	—	—	—	50	50	20	20	20	20
F-225C	100	—	—	—	—	—	100	100	100	100	100	100
S-400B	40	—	—	—	—	—	"	"	"	"	"	"
F-400C	100	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"	"
S-600	50	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"	"
F-600C	100	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"	"
F-800B	"	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"
F-1000B	"	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"
F-1200	"	—	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"

(a) AC 220Vにおけるしゃ断容量

下位FFB しゃ断容量 (kA)	上位FFB しゃ断容量 (kA)	F-100C	F-100E	L-100	F-225C	L-225	F-400C F-600C	L-400	L-600 L-800	F-800B F-1000B F-1200	F-1400	F-1600 F-2000 F-2500 F-3200 F-4000
		15	35	75	30	75	40	100	100	40	50	100
F-50E	5	10	20	20	10	10	10	10	10	10	5	5
L-50	30	—	35	75	30	75	35	50	50	30	30	30
S-100C	5	—	—	—	10	10	10	10	10	10	5	5
F-100C	15	—	—	—	25	75	15	15	15	15	15	15
F-100E	35	—	—	—	—	"	40	100	100	40	40	40
S-225B	7.5	—	—	—	—	—	10	10	7.5	7.5	7.5	7.5
F-225C	30	—	—	—	—	—	35	100	100	35	30	30
S-400B	25	—	—	—	—	—	"	"	"	"	"	"
F-400C	40	—	—	—	—	—	—	—	"	40	50	50
S-600	25	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"	"
F-600C	40	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"	"
F-800B	"	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"
F-1000B	"	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"	"
F-1200	"	—	—	—	—	—	—	—	—	—	"	"

(b) AC 460Vにおけるしゃ断容量

能な電力供給信頼性の高い配電方式である。

従来、次に述べるような理由からこのような動作協調を要求される回路構成は、ACBの分野であり、FFBでは困難なこととされていた。

(1) FFBの瞬時しゃ断時間は、小容量のものから大容量のものまで含めても、5~20msの範囲に入る高速しゃ断動作をするため、標準FFBどうしの組合せでは、分岐しゃ断器の全しゃ断時間以内に主しゃ断器の引はずし動作が開始されるため、同時しゃ断が避けられない。

(2) FFBは高速しゃ断であるがゆえに、小形で高しゃ断能力

をもっているが、ACBのように短時間過電流耐量が大きくないため、主しゃ断器の引はずし時間を長くすると、しゃ断時の通過電流ピーク値 I_p や通過 $I^2 \cdot t$ に耐えられなくなる。

すなわち、選択しゃ断の動作協調をとらせるための主しゃ断器としては、短時間過電流耐量の増大と、短限時要素の付加が条件となる。

以上の条件を満たし、従来形FFBでは不可能とされていた選択しゃ断協調を可能にしたのが三元特性FFBで、図7に示すように標準FFBがもつ長限時要素と瞬時要素に短限時要素を付加したものである。

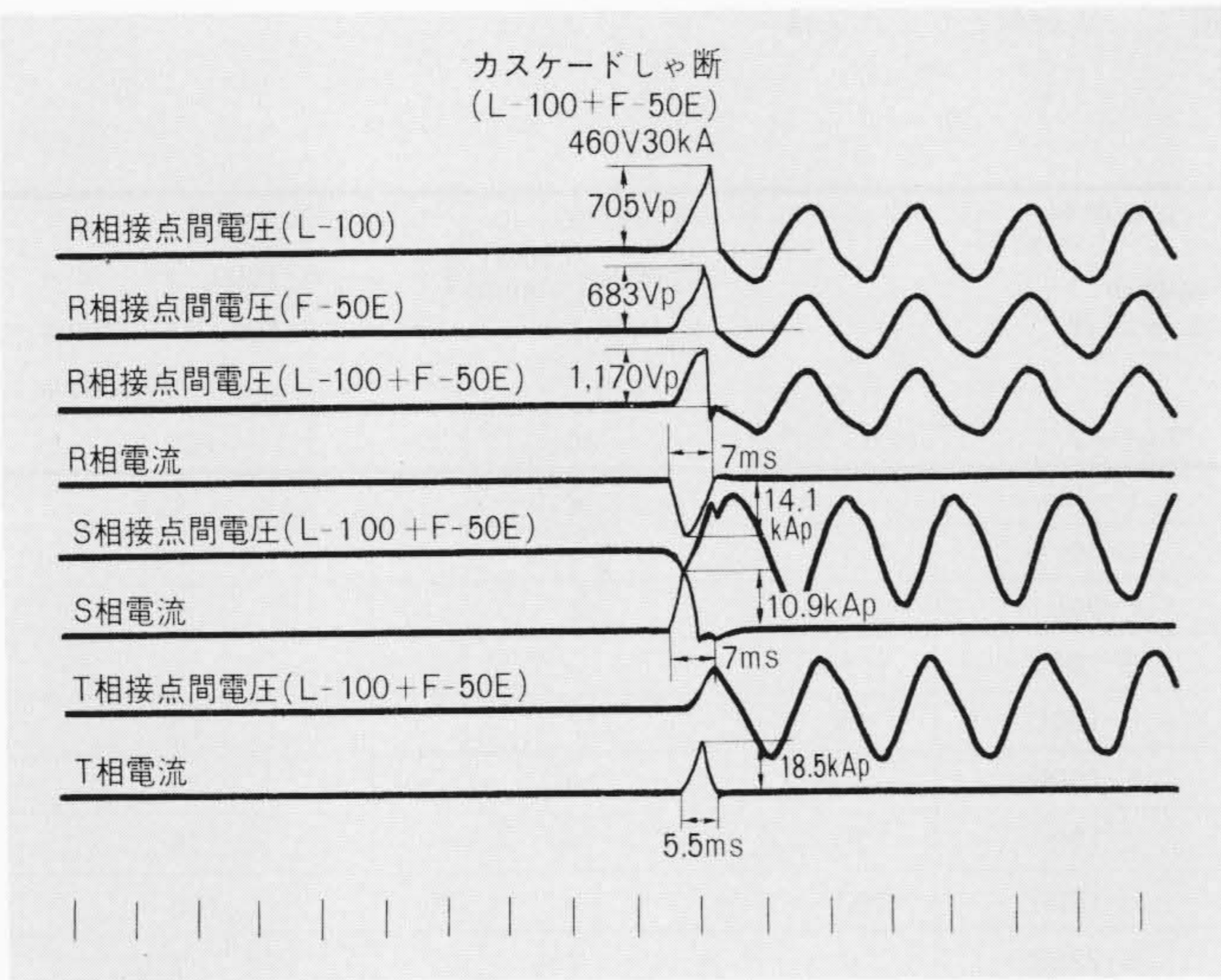


図5 カスケードしゃ断のオシログラム(L-100とF-50Eの例) 上位FFB L-100フレームのアーク エネルギー負担が、下位FFB F-50Eフレームのそれよりも大きく、十分なバックアップ効果を発揮している。F-50Eのしゃ断能力460V 5kAに対し、カスケードしゃ断能力は30kAに向上する。

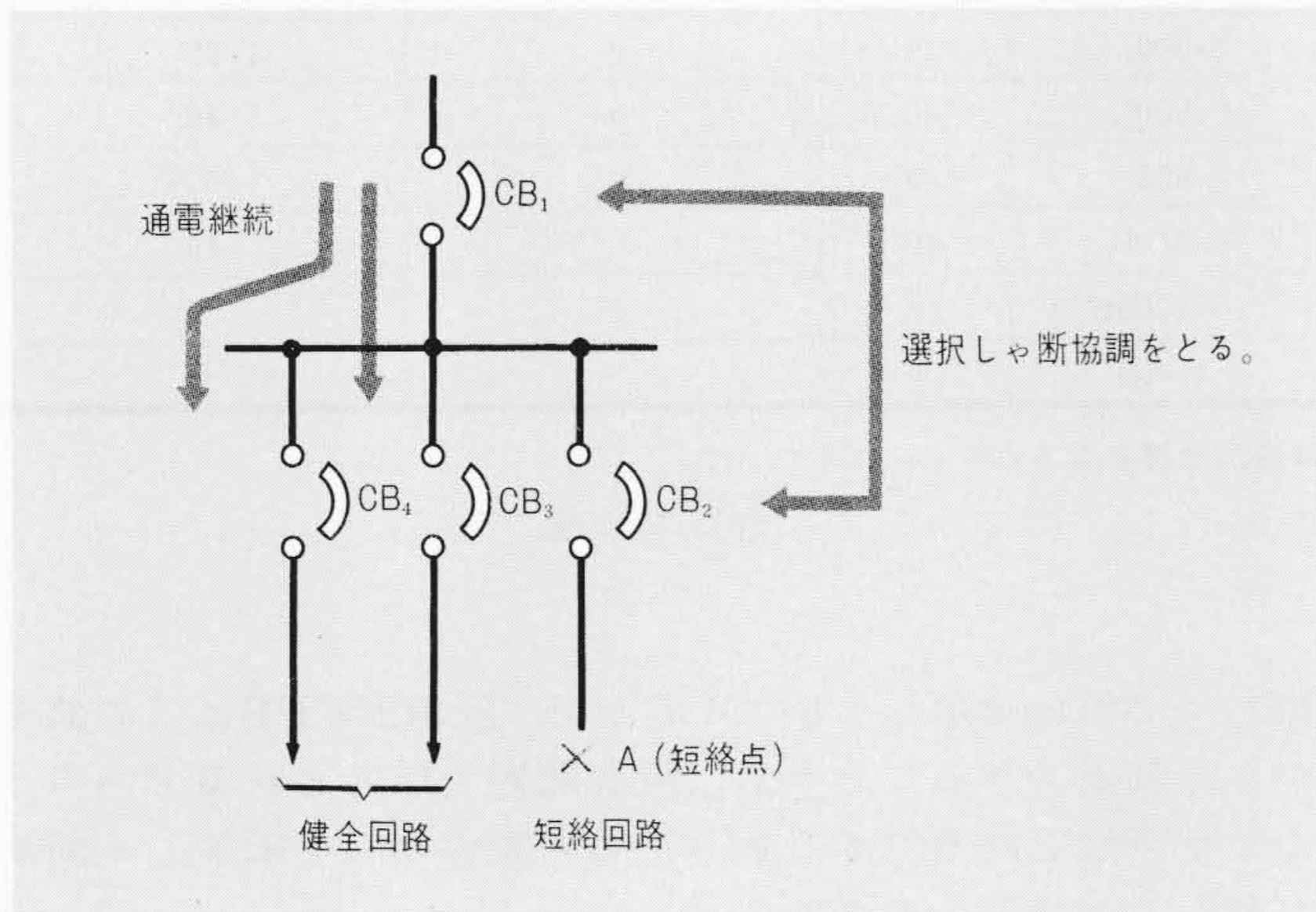


図6 選択しゃ断方式 短絡事故が発生した場合、その事故回路だけを切り離し、他の健全回路への事故波及を防ぐ、電力供給信頼度の高い保護方式である。

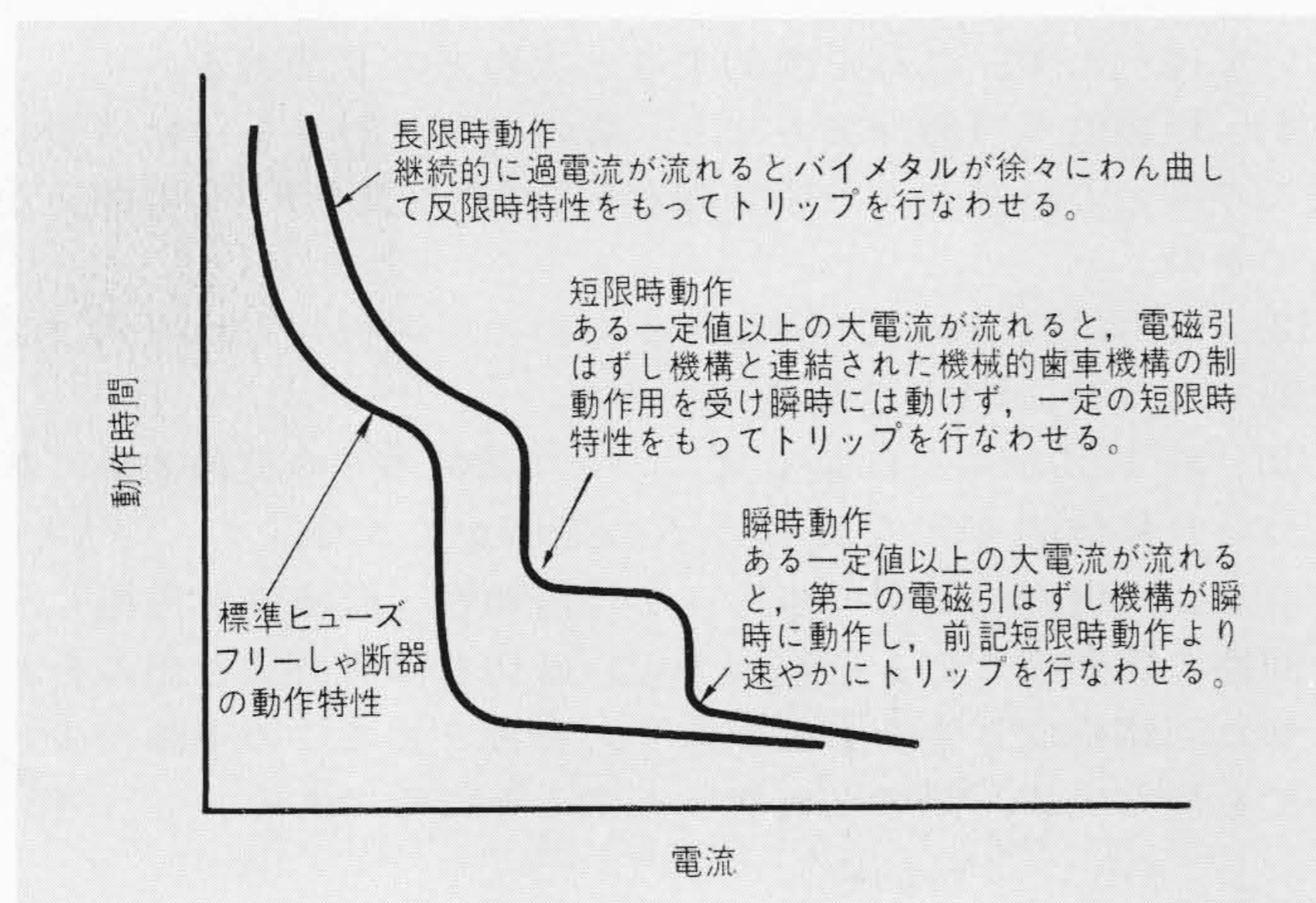


図7 三元特性FFBの動作特性 標準FFBのもつ長限時動作と瞬時動作に短限時動作要素を付加したもので、分岐回路に配置される下位FFBとの選択しゃ断協調特性が得られる。

短限時要素は、電磁石と歯車遅れ機構の組合せから成るが、比較的廉価に製作でき、特性的にも繰返しばらつき、経時変化などによる影響も少なく、良好な時延特性が得られることが確認されている。

短限時要素の遅れ時間については、下位の標準FFBの全しゃ断時間が、ほぼ5~20msの範囲に入っていることから、これより長ければよいわけで、50~100ms程度あれば十分と考えられる。

図8に短限時動作領域におけるしゃ断試験のオシログラムの一例を示すが、下位FFBとの選択協調に必要な70~80msの遅れ動作が得られ、この条件における通電部の過電流耐量も確認された。

次に選択しゃ断協調範囲であるが、協調可能上限値は図9の I_t で決定されるものであり、また実際の適用範囲については、下位FFBの能力によっても異なるものと考えられる。

これは図9に示すように、下位FFBの限流特性が極めて優れており、しゃ断時の通過電流ピーク値 I_p を動作協調上限値の $\sqrt{2}I_t$ 以内に制限できれば協調範囲の拡大が可能である。

図10は各種FFBの定格しゃ断電流をしゃ断した際の通過電

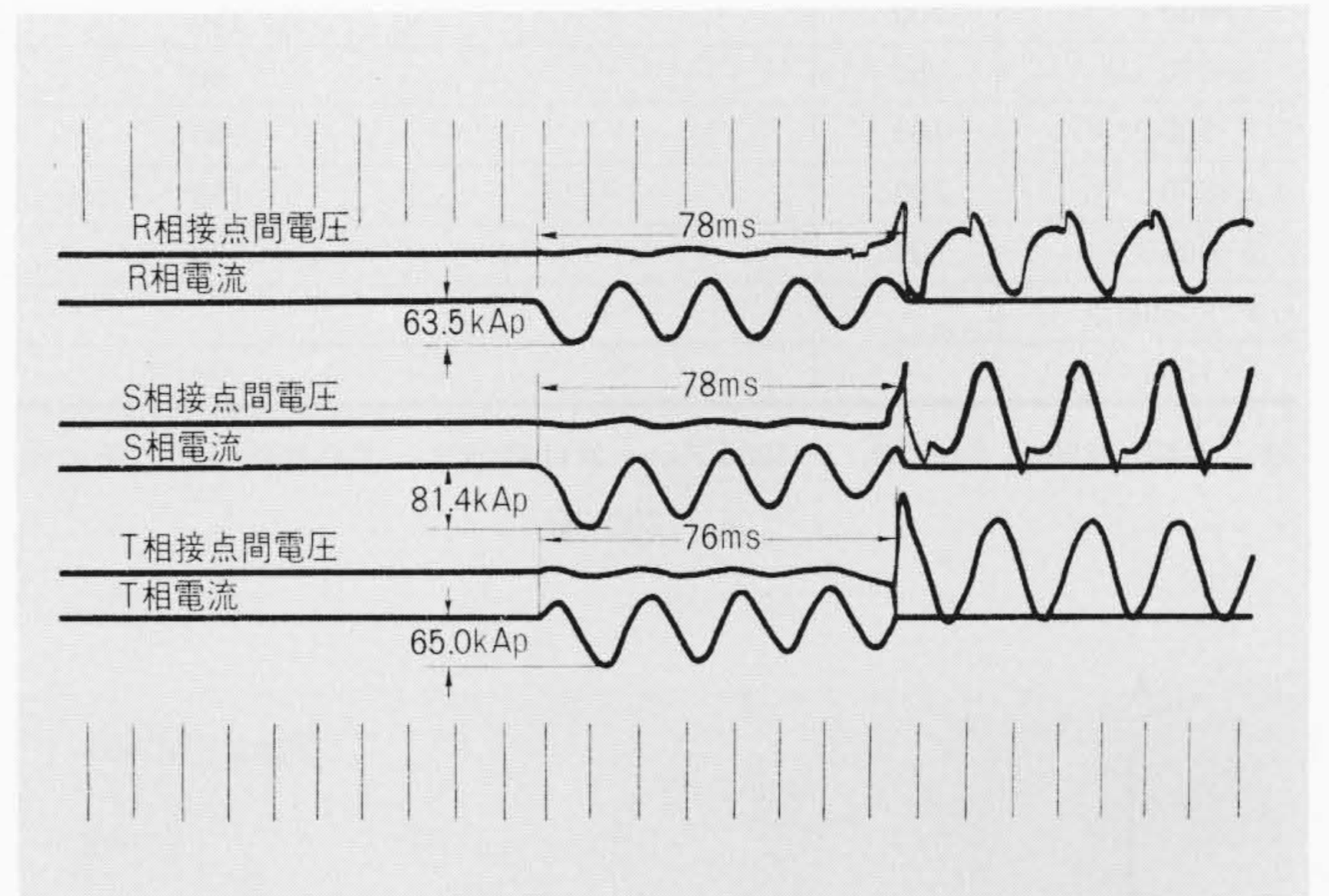


図8 短限時領域におけるしゃ断試験のオシログラムの例(F-4000フレーム at AC 460V 40kA) 試験の結果、選択しゃ断協調に必要な時延特性が得られ、FFB本体の異常もなく良好であった。

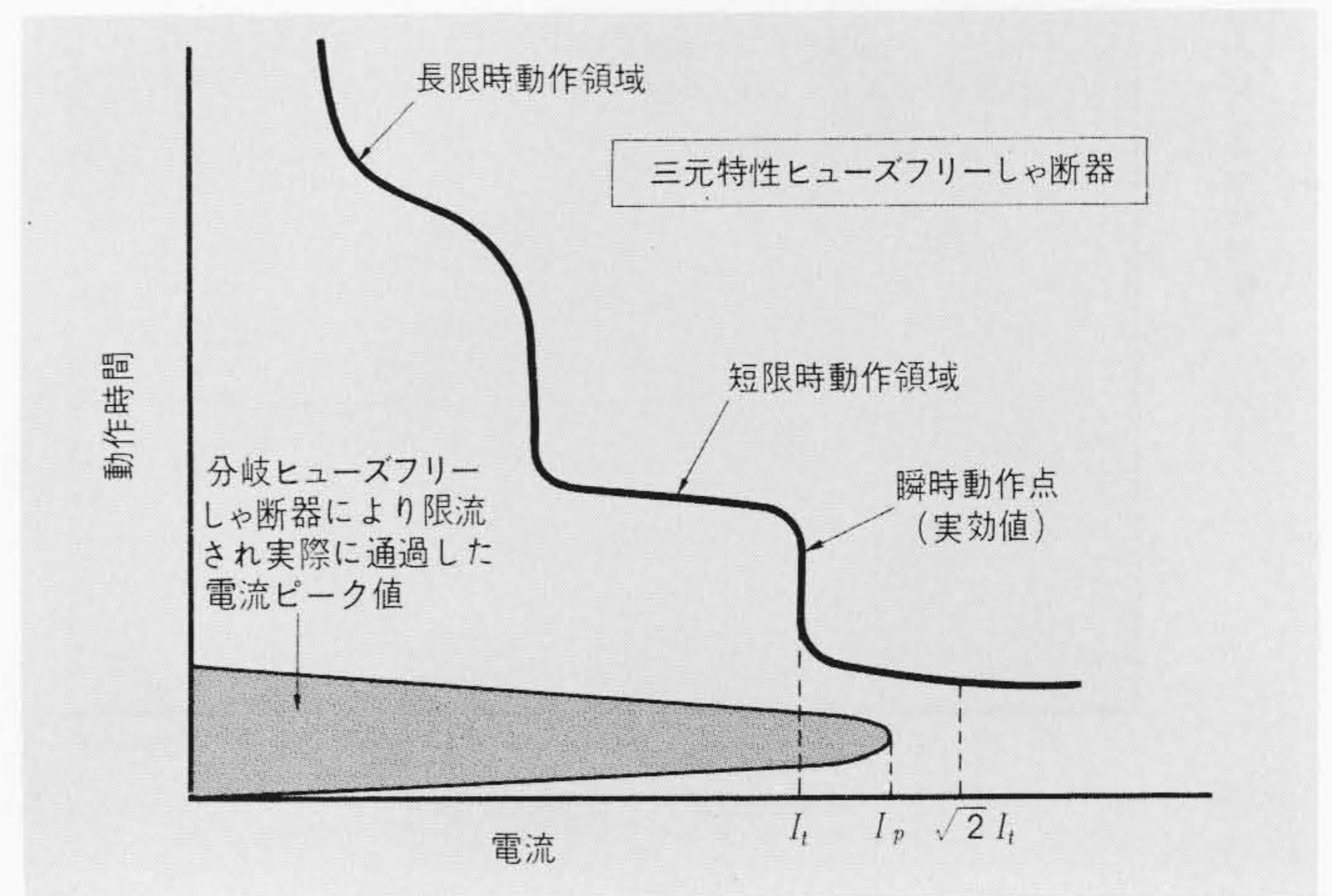


図9 三元特性FFBの選択しゃ断協調特性 電流-動作特性では、電流が実効値で表現されているため、選択しゃ断協調の可否は、 $\sqrt{2}I_t$ と通過電流ピーク値 I_p を比較されなければならない。

表3 三元特性FFBと選択しゃ断協調可能なFFBの組合せ及び協調範囲
主幹用として三元特性FFBを配することにより、広い範囲の選択しゃ断協調が可能である。

主幹用 しゃ断器 分岐用 しゃ断器	フレーム しゃ断容量 (kA)	三元特性	
		F-800B ^(250A) F-1000B F-1200	F-1600, F-2500* F-2000, F-3200* F-4000*
フレーム	しゃ断容量 (kA)	100	150
S-30, F-30B	2.5	2.5	2.5
S-50	5	5	5
F-50E	10	10	10
S-100B	5	5	5
S-100C	10	10	10
F-100C	20	20	20
F-100E	100	"	100
L-100	200	"	150
H-100B	"	"	"
S-225B	15	15	15
F-225C	100	20	100
L-225	200	"	150
H-225B	"	"	"
S-400B	40	"	40
F-400C	100	"	100
L-400	200	"	150
S-600	50	"	50
F-600C	100	"	100
L-600	200	"	150
F-800B	100	—	50
F-1000B	"	—	"
F-1200	"	—	"

主幹用 しゃ断器 分岐用 しゃ断器	フレーム しゃ断容量 (kA)	三元特性	
		F-800B ^(250A) F-1000B F-1200	F-1600, F-2500* F-2000, F-3200* F-4000*
フレーム	しゃ断容量 (kA)	40	100
F-30B	2.5	2.5	2.5
S-50	"	"	"
F-50E	5	5	5
S-100C	"	"	"
F-100C	15	15	15
F-100E	35	20	35
L-100	75	"	75
H-100B	200	"	100
S-225B	7.5	7.5	7.5
F-225C	30	20	30
L-225	75	"	75
H-225B	200	"	100
S-400B	25	"	25
F-400C	40	"	40
L-400	100	"	100
S-600	25	"	25
F-600C	40	"	40
L-600	100	"	100
F-800B	40	—	40
F-1000B	"	—	"
F-1200	"	—	"

注：*印F-2500, F-3200, F-4000フレームは標準として三元特性付, その他の機種は追加仕様となる。

(a) 200V級

(b) 400V級

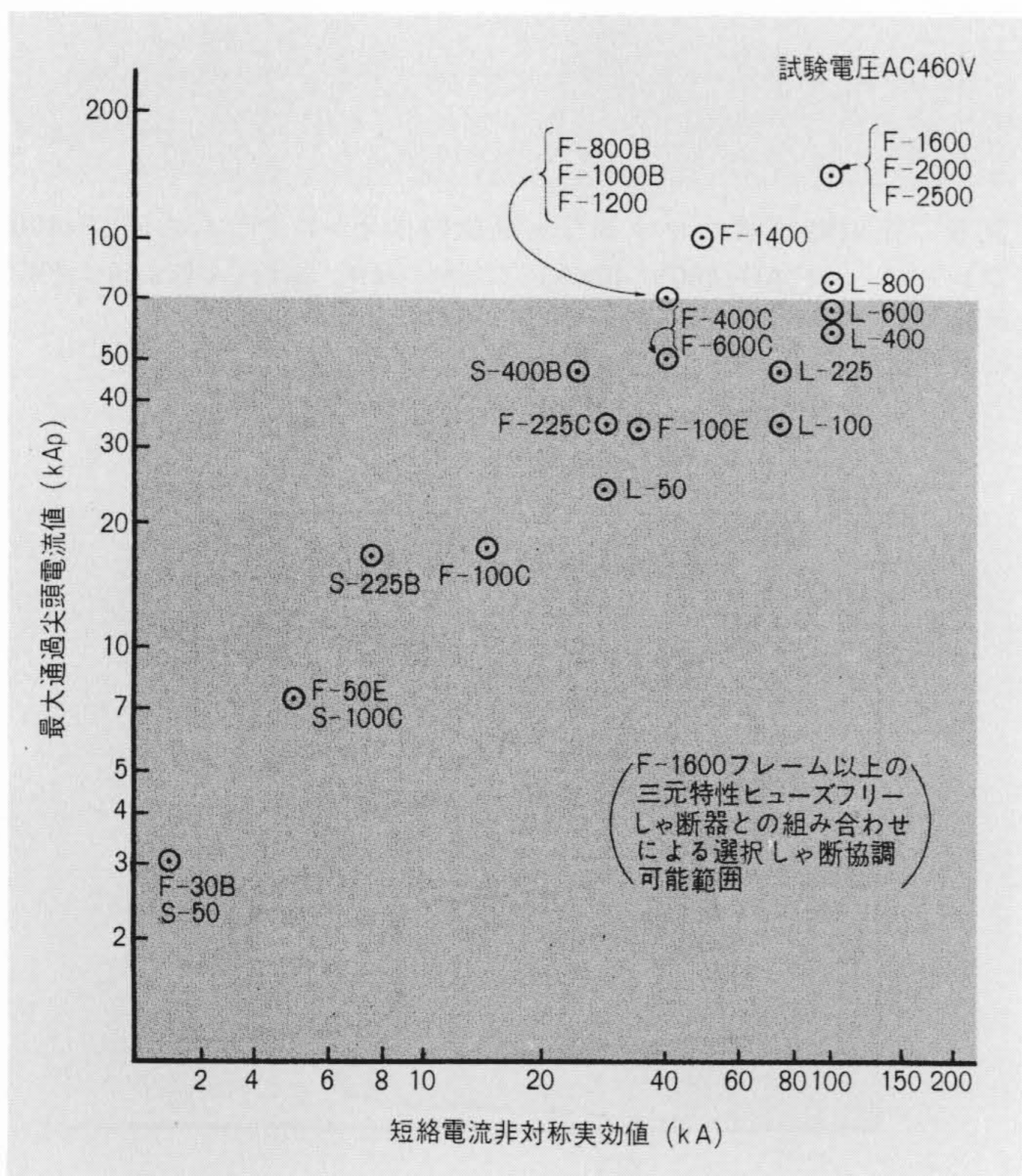


図10 各種FFBのしゃ断試験時の通過電流ピーク値 Lシリーズ(限流形)FFBは、限流特性が良好なため、選択しゃ断システムの下位FFBとして協調範囲が広く有効である。

流ピーク値 I_p を示したものであるが、限流形FFBはこの値を小さく制限できることから、協調範囲も広くとれるであろうことが予想される。すなわち、この要件からも限流しゃ断が有利なことは明らかである。

これらの検討結果により、主しゃ断器として三元特性FFBを使用した場合のFFBどうしの選択しゃ断協調可能な組合せ及び協調範囲を表3に示す。

5 結 言

以上、低圧電路保護システムのうち主に短絡保護協調について述べたが、これを要約すると次のとおりである。

- (1) 経済的な短絡保護方式としてのカスケードしゃ断についての考え方の確立と、協調能力をもつ高性能形FFBの開発ができた。
- (2) 電力供給信頼度を向上するための、選択しゃ断方式に必要な三元特性FFBの開発ができた。
- (3) 前(1)(2)項の各保護方式について、数多くの実験結果に基づいた具体的モデル システムの提示ができた。

なお、実際の適用に当たっては信頼性・経済性を考慮し、回路の重要度なども勘案のうえ、適切な保護方式を組み合わせた回路構成とする必要があり、参考としてこの小論が少しでも役だてば、筆者らの幸いとするところである。

参考文献

- (1) 鈴木, 橋爪: 「限流形ヒューズフリーしゃ断器の開発」 日立評論 52, 454 (昭45-5)