

400kV 送電線の送電容量

Transmission Capacity of the 400 kV Power Line

三 田 勝 茂*
Katsushige Mita

内 容 梗 概

送電線の送電容量の限界は長距離のものは安定度の点から、短距離のものは送電損失により制限される。400 kV 送電線について前者の点から再閉路も考慮に入れて検討してみると、一線地絡故障のみを対象とすると、一回線単独では 100 km で 500 MW、二回線構成では 400 km で 500 MW、300 km で 680 MW 程度となる。二線地絡を考えればこれを下回る結果となるゆえ、この程度の送電容量を期待するには系統連けの強化、開閉所の設置、その他の考慮を必要とする。

1. 結 言

一般に送電線の送電容量の限界は長距離のものにおいては安定度の点から、比較的短距離のものについては線路損失から制限をうける。したがって 400 kV 送電線を考える場合その送電容量は系統条件などによって大幅に異なるわけで、わが国の場合にはやはり数百キロ離れた山間の電源地帯からの大電力の輸送に目標がおかれ、また電源地帯において系統の強固な連けいが期待できないことも予想されるゆえ必然的に安定度の点から送電容量が制限され、これと関連してその信頼度も問題になると考えられる。かかる問題は個々の予想される系統について詳細に検討することが望ましいが一応 400kV 送電線の送電容量の目安をうる意味で安定度上からみた送電電力について簡単な系統について考えてみよう。

2. 系統の安定に必要な無電圧時間

いま 400 kV 送電線により山間部電源地帯から里側に送電する場合を考え、送、受電端の機器は送電容量に見合う容量をもつものとし、また受電端低圧側は無限大母線とする。機器および系統定数としては 400 kV 級における典型的な値⁽¹⁾ (60 規準) を用い送電端高圧側において種々の故障を想定し、再閉路を考慮して送電容量と送電距離の点について検討すると下記のとおりである。なお故障は発生後 0.1 秒で除去されるものとする。

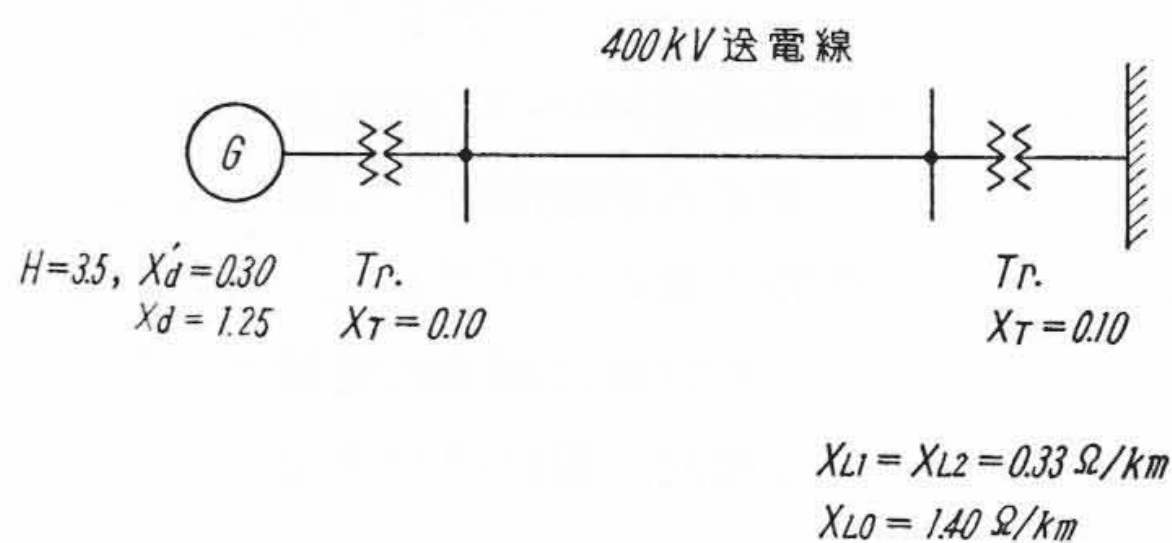
2.1 一回線単独送電

第 1 図に示すように一回線単独系統において 100 km 以上で 4～500 MW の送電を考えると一線地絡故障に対しても単相再閉路を行わなくては系統の安定を保ち得ないので一線地絡故障のみを考え、系統の安定のために必要とする無電圧時間を求めると第 2 図のようになる。この無電圧時間は系統の安定上から要求されるもので、遮断器が開路されてから再閉路するまでの時間である。故障アーク消滅のために必要な無電圧時間は故障電流の大きさ、健全線との結合による二次電弧電流、したがって区間長さと系統電圧、気象条件などによって左右され、各国において研究、実験が行われているがまだ十分に解明されていない現状⁽²⁾である。スウェーデンの 380 kV 系統での試験結果⁽³⁾によれば 500～1,000 A 程度の地絡電流に対し単相再閉路は区間長さ 240 km 以下で消弧可能で、消弧のための必要な無電圧時間は 0.4～0.8 秒であるとしている。また別にソ連の 400 kV 系統での試験結果⁽³⁾は地絡電流 2,000 A で単相再閉路に必要な無電圧時間を下記の式で与えている。

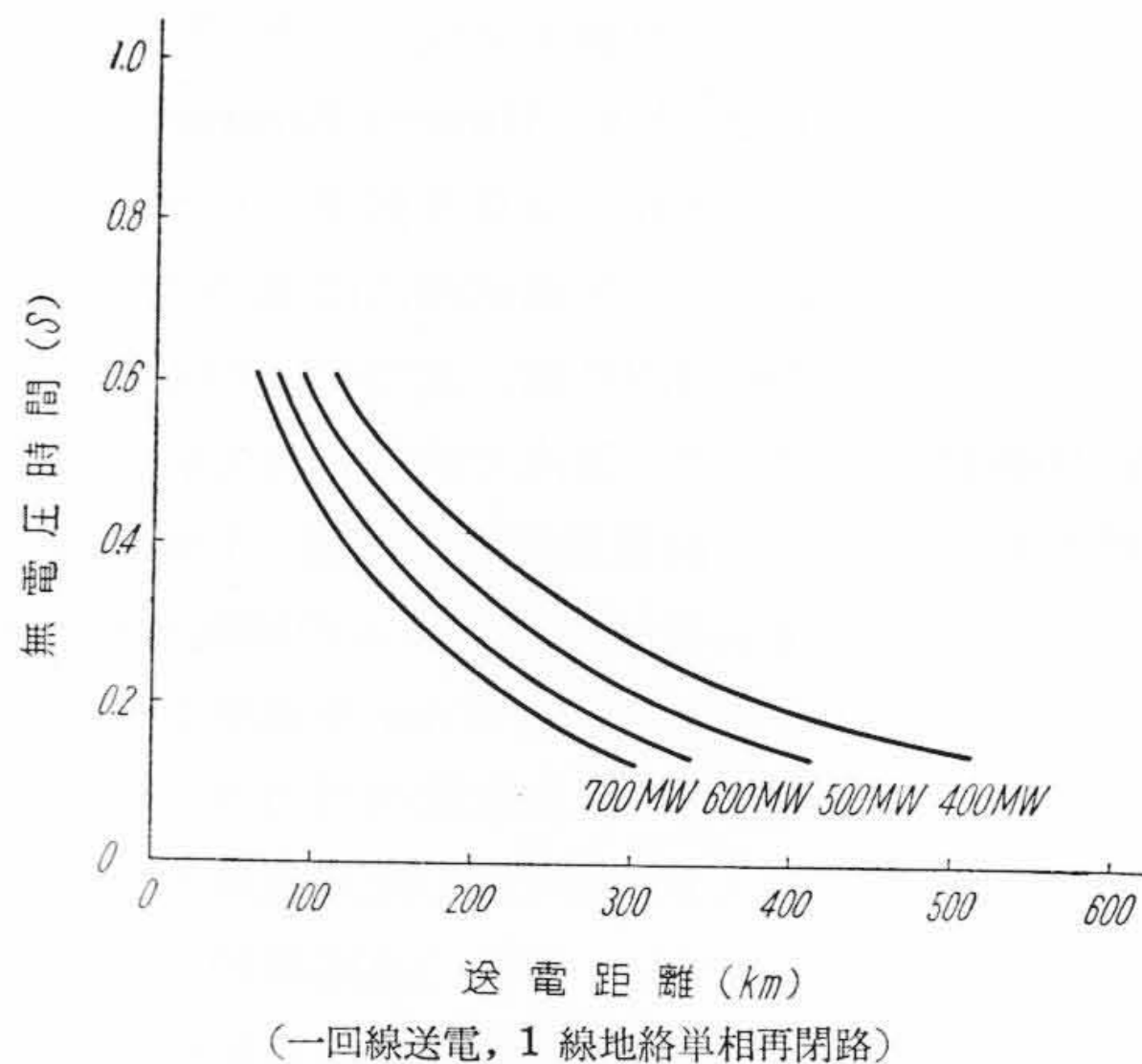
$$t = 0.003 l$$

ここで t は秒、 l は送電線の区間距離を km で表わしたものである。第 1 図の系統では機器容量、故障点により故障電流は異なるが

* 日立製作所国分工場



第 1 図 400 kV 一回線送電系統



第 2 図 系統安定に必要な無電圧時間

いずれも 2,000 A をはるかにこえる値となる。故障アーク消滅に必要な無電圧時間は地絡電流にほぼ比例すると考えられるが、一応この場合 0.6 秒と仮定しても単独の 400 kV 送電線では送電容量 400～500 MW を期待できるのはせいぜい 100 km 程度であることがわかる。

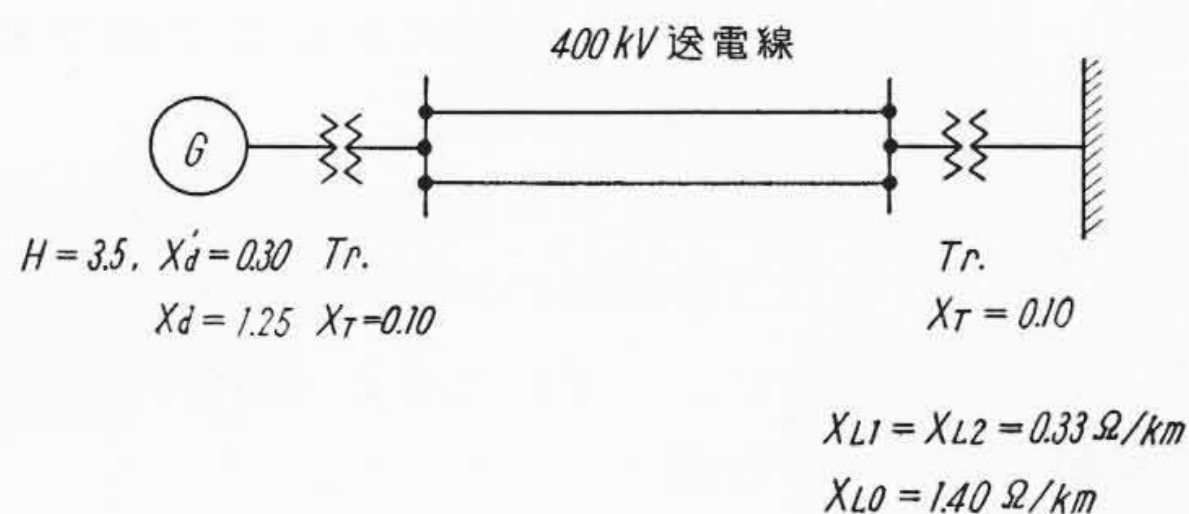
2.2 二回線送電

次に 400 kV 系統が第 3 図のように二回線構成の場合やはり上記同様系統安定のための所要無電圧時間を求めてみると次のとおりである。400 kV 一回線でこれとほぼ同一の定数をもつ低圧系統が並列されているときも同一となる。

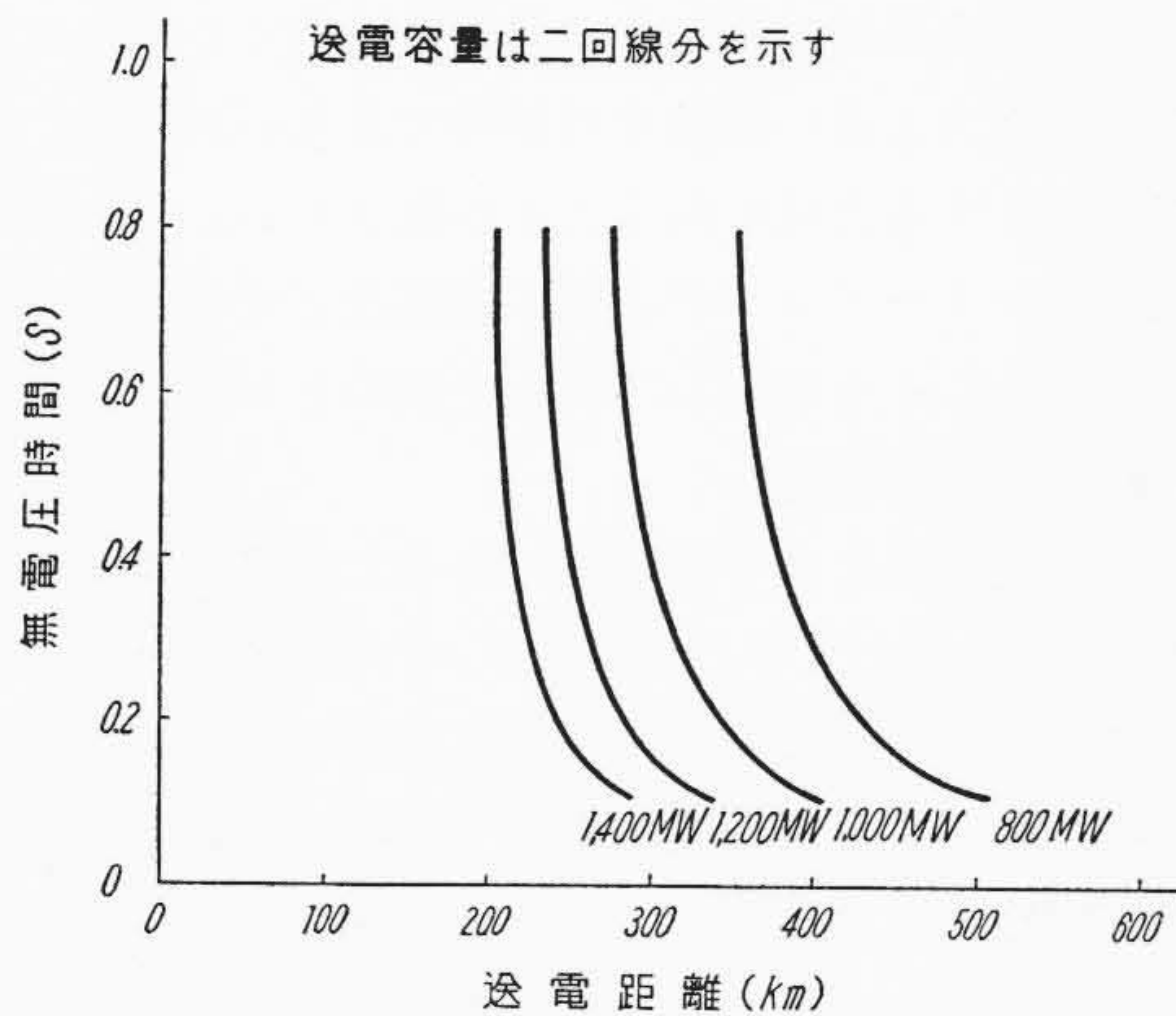
一線地絡故障に対し単相再閉路を行うときは第 4 図に示すとおりである。

また二線地絡故障を想定し、三相再閉路を行うものとする第 5 図のようになり、またこれと同一条件でちょうど中間に開閉所が一箇所あるときは第 6 図のようになる。

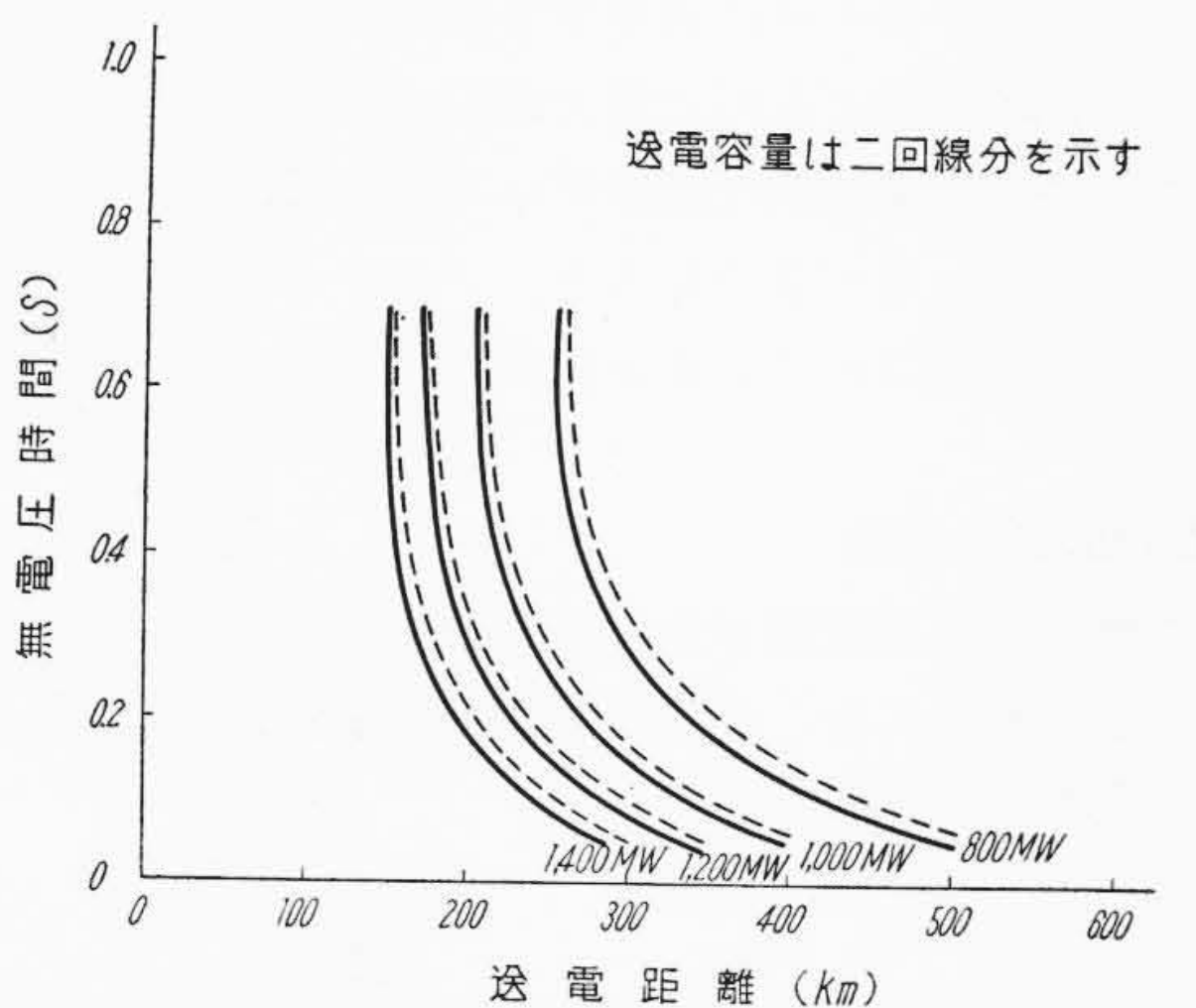
三相再閉路時故障アーク消滅のために必要な無電圧時間も 400kV 系統についてはまだ十分明らかにされていない⁽⁴⁾。単相再閉路よりは条件が楽となると考えられるが、送電電圧が高いほど、また故障



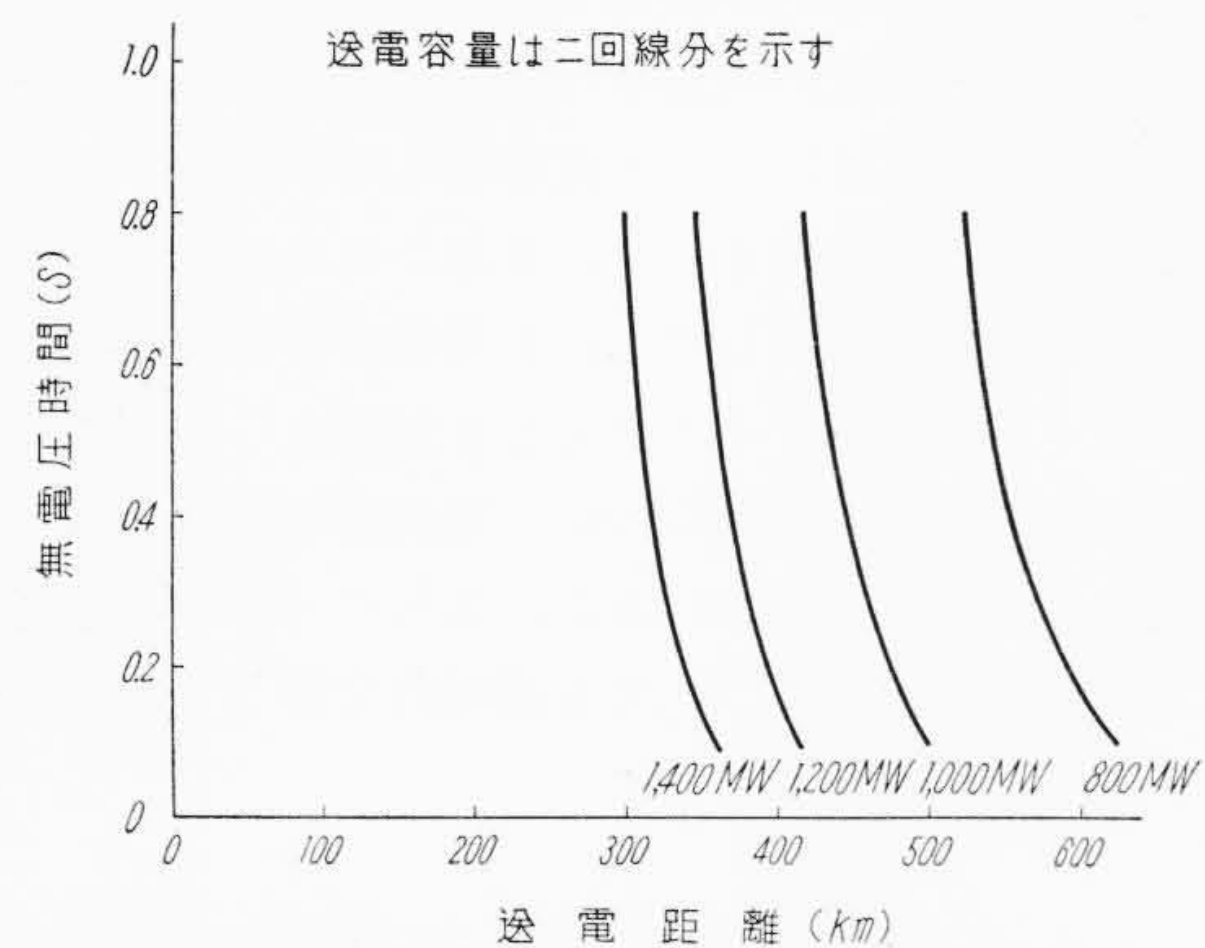
第3図 400 kV 二回線送電系統



第4図 系統安定に必要な無電圧時間



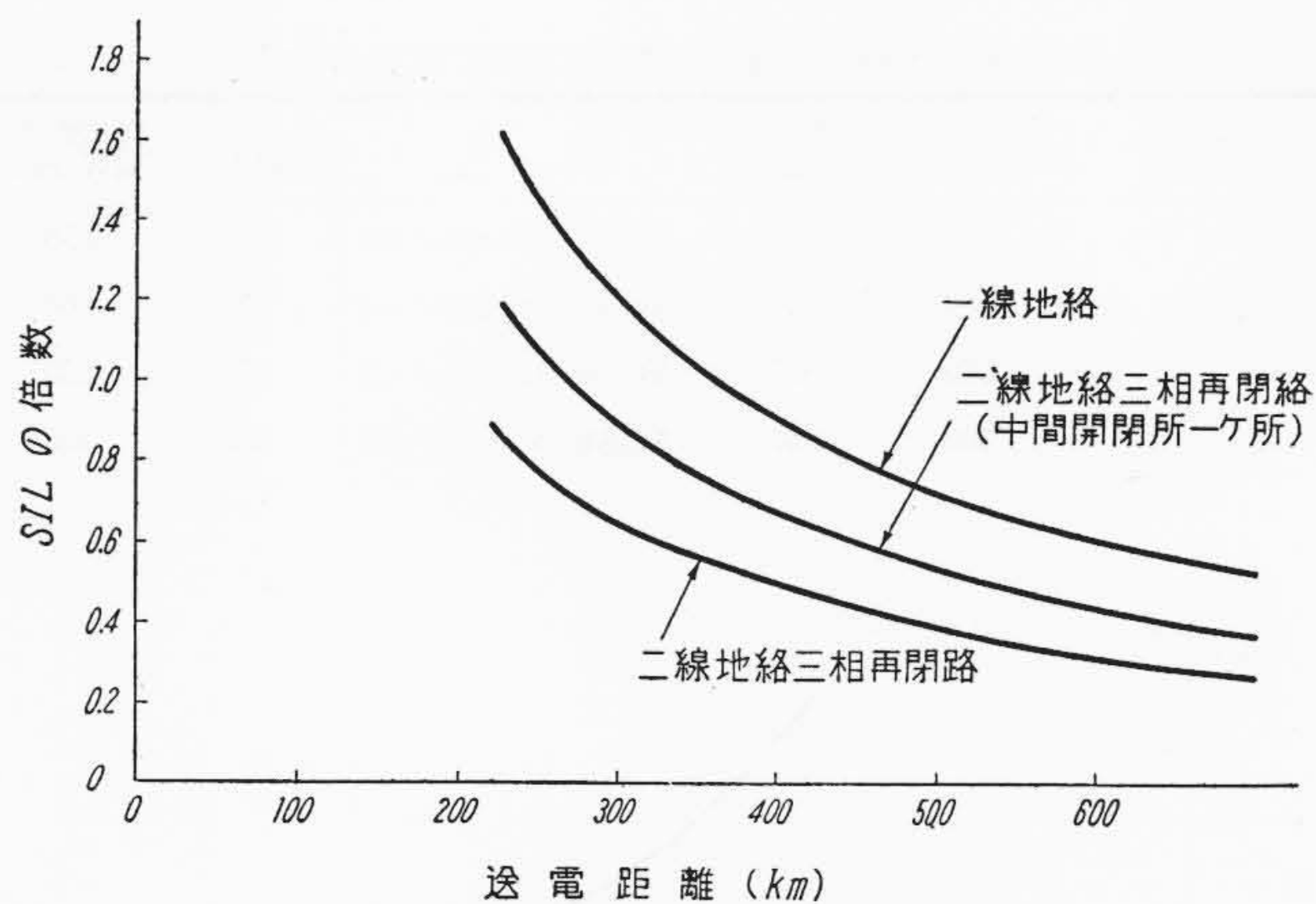
第5図 系統安定に必要な無電圧時間



第6図 系統安定に必要な無電圧時間

電流が大なるほど大となるであろうし、また距離も関連すると思われる。一応これを 0.4~0.6 秒程度と考えればこの場合の送電距離と送電容量の関係を第 5, 6 図よりうかがうことができる。

二線地絡時二相再閉路を行うものとして求めた無電圧時間を第 5 図に点線で示した。これについては種々論議があるが、二回線構成



第7図 400 kV 送電線の送電容量

のとき同一回線内の二線地絡に対し二相再閉路をしてもあまり効果が期待できないが、回線間にまたがる異相地絡に適用すれば全停電をまねくことなく有効と考えられる。

3. 送電距離と送電容量

3.1 送電距離と送電容量

以上は 400 kV 系統の安定に必要な再閉路のための無電圧時間を求めたわけであるが、これらの結果に対し、故障アーク消滅に必要な無電圧時間を仮定して 400 kV 送電線の送電距離と送電容量の関係を求めることができる。一回線単独送電のときを除き二回線送電の場合について求めると次のとおりである。

まず一線地絡故障のみを考えた場合、300~600 km の距離において単相再閉路は考えられないから第 4 図において再閉路せずに安定な限界から送電距離と送電容量の関係を求めると第 7 図のようになる。同図においては一回線当りの送電電力をサージインピーダンス負荷 (Surge Impedance Loading, 略して SIL) の倍数で表わしている。SIL は次の式から求められる。

$$\text{SIL} = \frac{(\text{kV})^2 \times 10^3}{Z_0} \text{MW}$$

ただし Z_0 はサージインピーダンス、kV は基準系統電圧を kV 単位で表わしたものである。サージインピーダンスは単導体では大体 400 Ω 、二導体で 310 Ω 、四導体で 280 Ω 程度である。第 7 図では $Z_0=282 \Omega$ で、400 kV では $\text{SIL}=567 \text{ MW}$ となる。SIL により送電電力を表現すればサージインピーダンスは導体数が決まればほぼ一定ゆえ、電圧に無関係に送電電力を求められる利点がある。

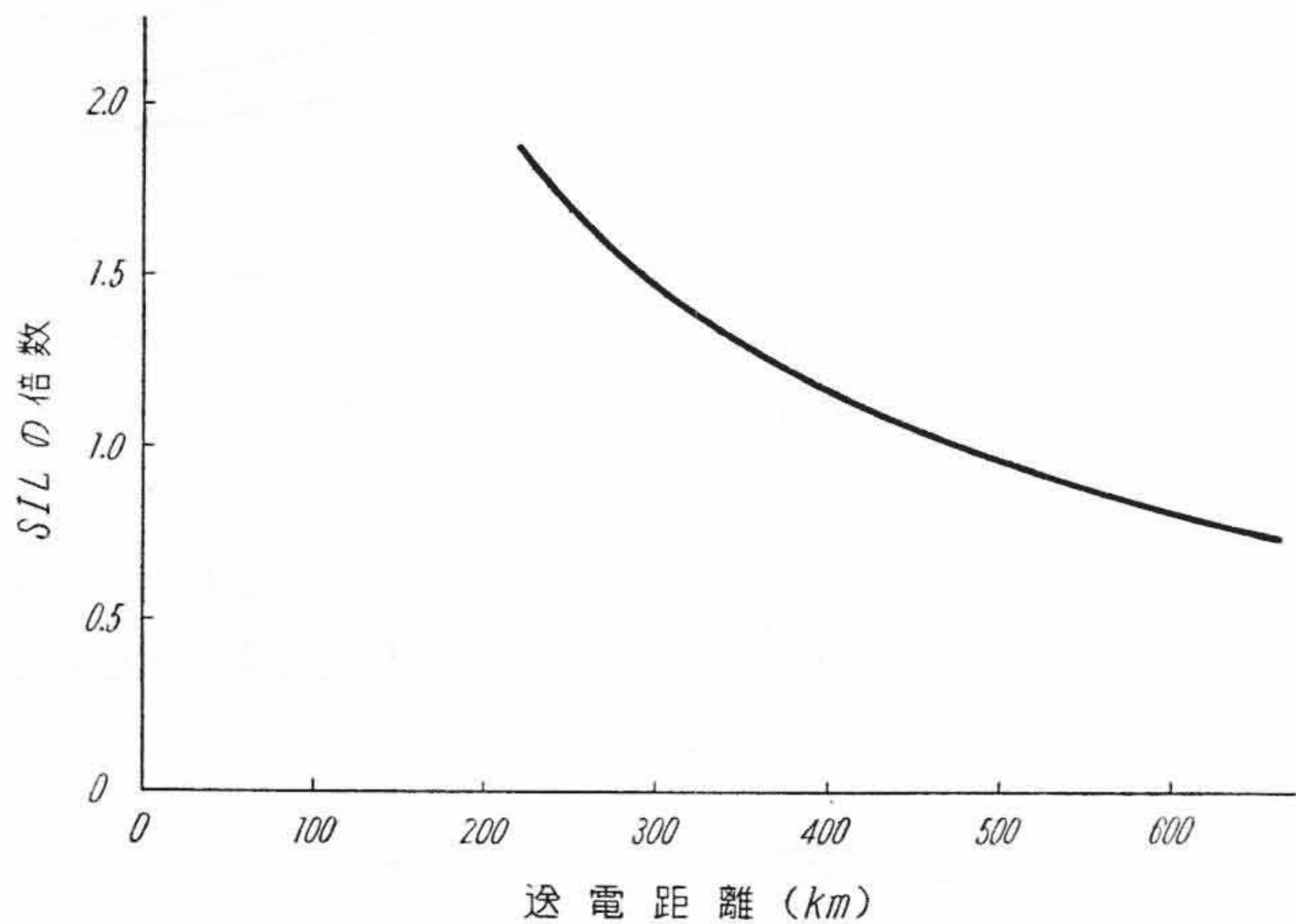
次に二線地絡故障に対し三相再閉路を行うとき、故障アーク消滅に必要な無電圧時間を 0.4 秒と仮定すれば、中間開閉所ありおよびなしの場合の送電容量は第 7 図のようになる。中間開閉所の数が多くなれば送電容量限界がこれより大となることはいうまでもない。また第 5, 6 図よりわかるとおり故障アーク消滅のため 0.4 秒程度の無電圧時間を考えるとこの辺では再閉路の時間差による送電容量の限界の変化はあまり大きくない。つまり再投入時間がこの辺ではあまり問題とならないことがわかる。

回線間にまたがる二線地絡に対しては故障アーク消滅のための無電圧時間は各回線について一線地絡が生じたのと同様に考え、さきの一線地絡のときと同じく二相開放の状態では安定な限界から送電容量を求めてみると第 7 図の二線地絡三相再閉路の場合をわずかに上回る程度である。

以上より一線地絡故障のみを考えれば 300 km で 680 MW/cct, 400 km で 500 MW/cct 程度を期待できるが後で述べるように信頼度の点で問題が残る。

第 1 表 400 kV 級送電線の送電容量の実績

国 名	電 圧 (kV)	送電距離 (km)	導 体	SIL (MW)	送電電力 (MW/cct)
スウェーデン	380	700	ACSR 592 mm ² ×2	465	350
西 ド イ ツ	380	340	ACSR 280 mm ² ×4	572	600
フ ラ ン ス	380	515	ACSR 411 mm ² ×2	479	550
ソ 連	400	850	ACSR 280 mm ² ×4	580	500



第 8 図 送電系統の送電容量

3.2 諸外国の例

スウェーデン、ドイツ、フランス、ソ連など諸外国の 400 kV 級送電線の実績⁽³⁾は第 1 表のとおりであるが、いずれも単一な系統でなく、開閉所の設置、既設系統との連けいが行われている。

別に系統の安定度から見た送電電力の目安を与えるものとし一線地絡故障時、故障相開放後の過渡時の電力一相差角曲線の最大値の 80% に送電電力を選ぶのが適切であるとする考えがある⁽⁵⁾。第 8 図はこれにもとづいて開閉所なしの系統につき求めたものである。これはこのように送電電力を選べば故障相開放後は高速度で再閉路を行わなくても系統の安定を保ちうる点をもととしている。第 8 図においてはサージインピーダンスは 400 Ω としており、400 kV で SIL = 400 MW である。サージインピーダンスが異なるゆえ第 7 図と第 8 図の結果を直接比較することはできないが、系統電圧を仮定して送電電力を比較すると機器および線路定数が、多少異なるがほぼ似たような結果をうる。

3.3 送電容量と信頼度

長距離の送電線においては安定度が問題となる場合が多く、したがって想定する故障、すなわち一線、二線地絡あるいは三相短絡のいずれを系統安定度の目標とするかにより送電電力とその信頼度が異なる。

前述の結果において一線地絡故障のみを考えれば二回線構成の 400 kV 送電線により 300 km で 680 MW/cct、400 km で 500 MW/cct 程度を期待できるが、これでは信頼度の点で問題が残る。400 kV 送電線を考える場合、安定度に関してはより低い電圧階級と同一の考え方によれば電圧の上昇により事故発生率は減少するゆえそれだけ信頼度を増すことができる。したがって上記程度の送電容量を期待する場合には系統連けいの強化、また二回線構成のときは少なくとも 2 ～ 3 箇所以上の中間開閉所の設置を考慮する必要がある。

アメリカにおいては三相短絡までを考えた経済的に余裕のある設計⁽⁶⁾がおもで、カナダ、ヨーロッパなどにおいては二線地絡を対象としている。400 kV 級系統については、初期の段階では安定度が問題となり一線地絡を考えたことがあるが、現在では系統が十分に

発達し、連けいも強固になったので余裕のある点で運用されている。

再閉路についてはフランスが 1 ～ 3 秒の单相再閉路、スウェーデンが三相再閉路、ドイツは 1.2 秒程度の再閉路を実施、またソ連においてはまだ実施されていない。いずれにせよ 400 kV 級送電線の再閉路無電圧時間は相当大きな値となっている。

4. 今後の問題点

以上のように電力系統が樹枝状に発達してゆくかぎりはそのままでは大きな送電電力と高い信頼度は期待できないわけで、できるだけ連けいを強固にする方向に向うことが望ましい。もちろん別に機器常数の選定、シリースコンデンサの採用などを考えてもよい。このほか考えられることを列記してみると次のとおりである。

4.1 故障相の高速度遮断

故障相の高速度遮断により安定度からみた無電圧時間（特に三相再閉路において）を大とすることができ、また故障アークの生長を阻止し、アーク消滅のための無電圧時間も短縮される可能性が考えられる。さらにこれにより高速度励磁形 AVR との組合わせにより常態、過渡の安定極限電力を増加することが期待され、また別に通信線の誘導防止の上からも望ましい。したがってリレー方式、遮断器とも現在より高速のものの開発に力がそそがなければならない。

4.2 故障アーク消滅のための無電圧時間

これについては今後十分に研究する必要があるが、送電電圧の上昇により無電圧時間がだんだん増大するとすれば高速度再閉路の利点が小となるゆえ、積極的な故障アーク消滅のための無電圧時間の短縮方法が検討されるべきであろう。フランスにおいては故障相の強制接地などが実験されていると報告⁽³⁾されているが興味ある問題である。

4.3 異相地絡の保護

経済的な観点から送電線が並行二回線構成となるとすれば二回線にまたがる異相地絡に対し適確な保護を行うリレー方式を確立してゆくことが必要である。

5. 結 言

以上 400 kV 送電線の送電容量について述べたが、400 kV 系統の導入は技術的な裏づけのある経済評価によるわけで、それゆえ機器その他詳細の技術的検討が必要である。このためには系統電圧が決定され、またある程度の機器の仕様も明確にされる必要がある。現状においてはまだ電圧について決定をみていないが、今後は早急にこの方向に進むことが望ましい。またこの場合さらに 400 kV より上の段階の電圧をも想定してこれと現在の使用電圧により 400 kV 系統の電圧をインターポレイトすることが望ましいと考える。

技術的諸問題の詳細の検討について電気協同研究会 400 kV 級送電専門委員会の活躍が期待されるが、さらに 400 kV 超高圧系の経済評価、電圧階級の決定についても積極的な努力を望む次第である。

参 考 文 献

- (1) 電気協同研究会：400 kV 級送電専門委員会 資料 系-136
- (2) H. Meyer：Cigré Report (1956) No. 318
- (3) 電気協同研究会、400 kV 級送電専門委員会：400 kV 級送電外国実態調査報告書
- (4) J. H. Kighorn：Cigré Report (1958) No. 121
- (5) W. H.：Reference Book Transmission & Distribution
- (6) C. Young：Notes on Power System Stability