

超 高 圧 機 器 の す う 勢

Recent Trends of Extra-high Tension Equipment

桑 山 正 俊* 小 川 毅*

Masatoshi Kuwayama

Takeshi Ogawa

内 容 梗 概

将来の送電電力の累増にそなえて、次の超高圧送電電圧を何 kV に昇圧するかは目下の重要課題となっている。本文では、変圧器、遮断器および保護方式について、世界の超高圧送電線における傾向を比較概説した。400 kV 級においては、各国ともにまだ十分な運転実績を重ねるには至っていないが、すでに次の昇圧にそなえての研究が始められている。日本においても現状では、400 kV 級に対して十分な技術レベルを有していると考えられるので、なるべく早い時期にその実現が希望される。

1. 緒 言

従来電力の増加率は、10年間に約2倍といわれ、将来の設備計画はその線に沿って行われていた。アメリカでは、1948年の発電出力が70,000 MWであったが、1958年—160,000 MW, 1968年—300,000 MWが見込まれている。日本においても最近の発電能力の増加率はさらに大幅に高められている。

このような電力需要の増加は、当然送電網の充実拡大を伴うが、ルートを増やすことは次第に困難となり、送電電圧の大幅な引上げが行われているのが各国の現状である。電圧を2倍に引上げれば、送電電力を4倍に増強することができるが、建設費は土地代ともで1倍半程度になるに過ぎない。

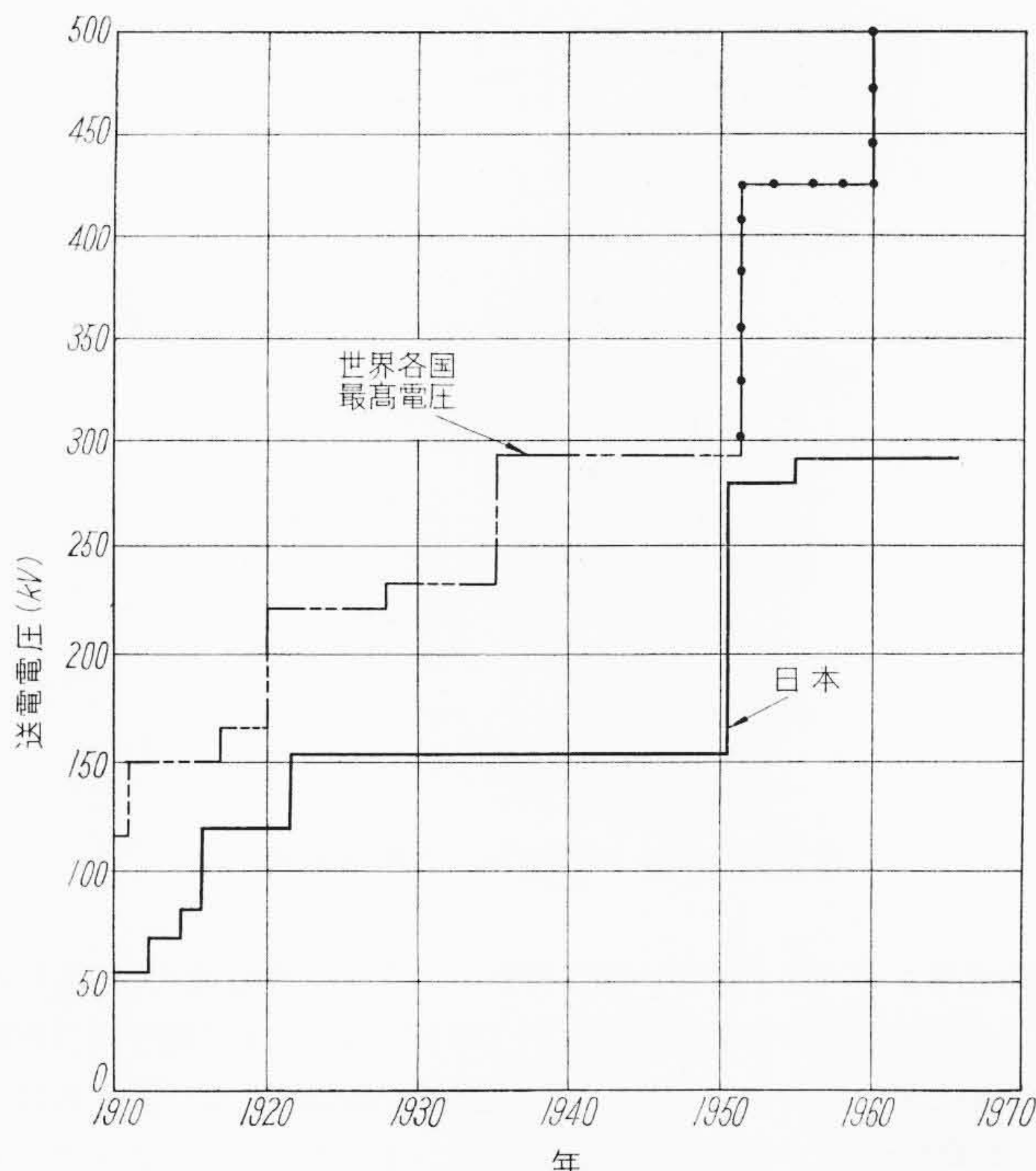
この数十年間の送電電圧の増加の足取りは第1図のとおりで、世界の最高電圧と、日本の最高電圧とはほぼ平行して延びてきている。これをさらに日本の系統の中でみると、60 kV → 110 kV → 220 kV,あるいは、70 kV → 150 kV → 275 kVのようにほぼ倍増の形をとっている。次にくる超高圧送電については、現在、電気協同研究会において、400 kV 級送電専門委員会が設けられ、機器、系統、送電の三方面から検討が行われている。

400 kV 送電線としては、スウェーデンの南北を結ぶ1,000 km 送電線(1952年)が最初のものであって、ソ連、フランス、西ドイツ、スイス、フィンランドなどは開始されたばかりであり、まだ十分な運転実績資料は得られていない現状である。さらに将来の昇圧にそなえてはスウェーデン、アメリカ、ソ連などにおいて650~750 kVの基礎研究が始められている。

アメリカ、イギリス以外の超高圧送電線は、主として、水力電源地帯から長距離の需要地に送電する目的のものである。イギリスの275 kV 送電線は、スーパーグリッドとして知られ、地域的な電力を網目状に連絡する目的のものであるが、400 kV 昇圧の研究も行われている。

日本の場合、現在の最高送電電圧が、275 kV であるので、次の電圧としては、500 kV に近いものが望ましいところである。しかし日本の水力地帯は大半開発を終り、今後は大火力の増設に重点がおかれるので、超高圧送電としてはそれらを連絡するとともに、途中の水力吸上げも行う必要があって、長距離の単純な送電線は実現しにくいと考えられる。さらに土地の狭小によるコロナ障害などの問題なども考え合わせて、そこから経済的かつ合理的な電圧が採用されるであろう。線路途中の雷害の問題は、ヨーロッパでははなはだ少ない。アメリカでは345 kV 送電線でかなりの問題が提起されており、750 kV 送電の研究でもこれは大きな課題となっている。400 kV 級以上の高鉄塔に対しては、日本でも耐雷設計上相当の考

* 日立製作所国分工場



第1図 世界と日本の最高送電電圧

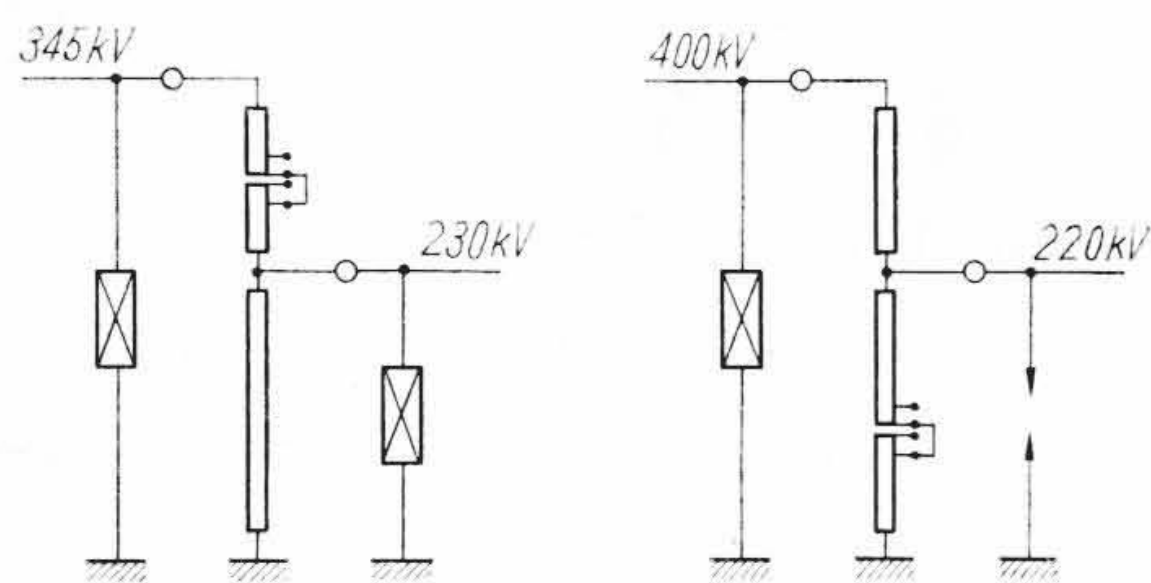
慮が必要と思われる。

400 kV 級の各機器については、本号の各論文に詳述するところであるので、ここでは世界の状況とも比較して概説することとする。

2. 変 圧 器

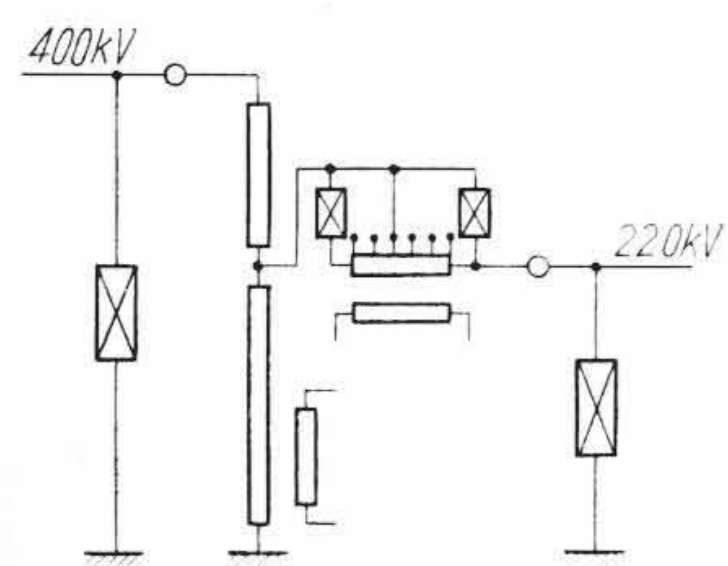
ヨーロッパ各国においては400kV昇圧にともない、既設の220kVあるいは110 kV 系統との連系を考え、発電所用および一部の変電所用を除いたほとんどの400 kV 変圧器には単巻変圧器が採用されている。これは同一電力通過容量に対し小形軽量にして性能よく、かつ安価なためである。この傾向はアメリカおよびカナダの345kV 系統においても同様である。

ヨーロッパにおける400 kV 変圧器の基準衝撃絶縁強度(BIL)は、スウェーデンでは初期のものは1,775 kV でもっとも高かったが、系統の拡大と避雷器の信頼度向上により最近では1,500 kV を採用しており、ソ連が1,500 kV、ドイツ、フランスは1,450 kV で IEC の基準(1,425 kV)に近い値を採用するようになった。アメリカのコモンウェルス・エジソン電力会社の Goodings Grove 変電所のように345 kV 系統で2段下のBIL 1,050 kV を採用しているところ

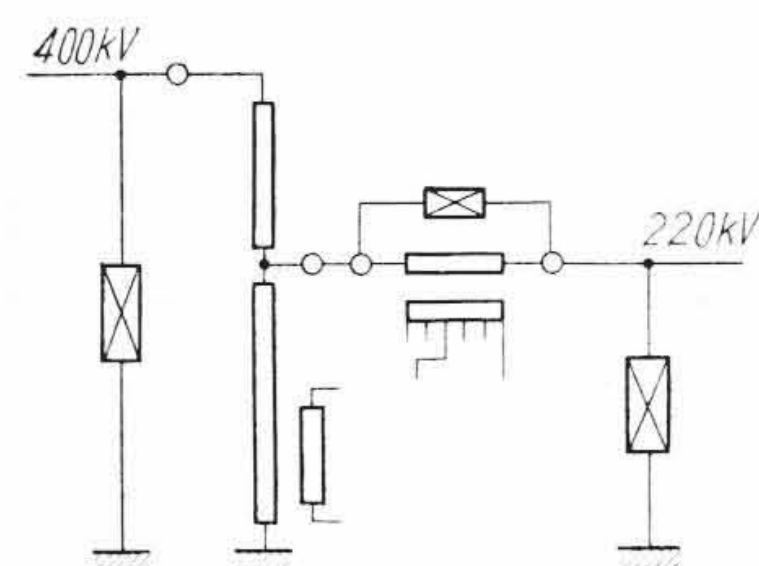


(1) アメリカ

(2) フランス



(3) ドイツ



(4) スウェーデン

第 2 図 タップ切換および巻線保護方式

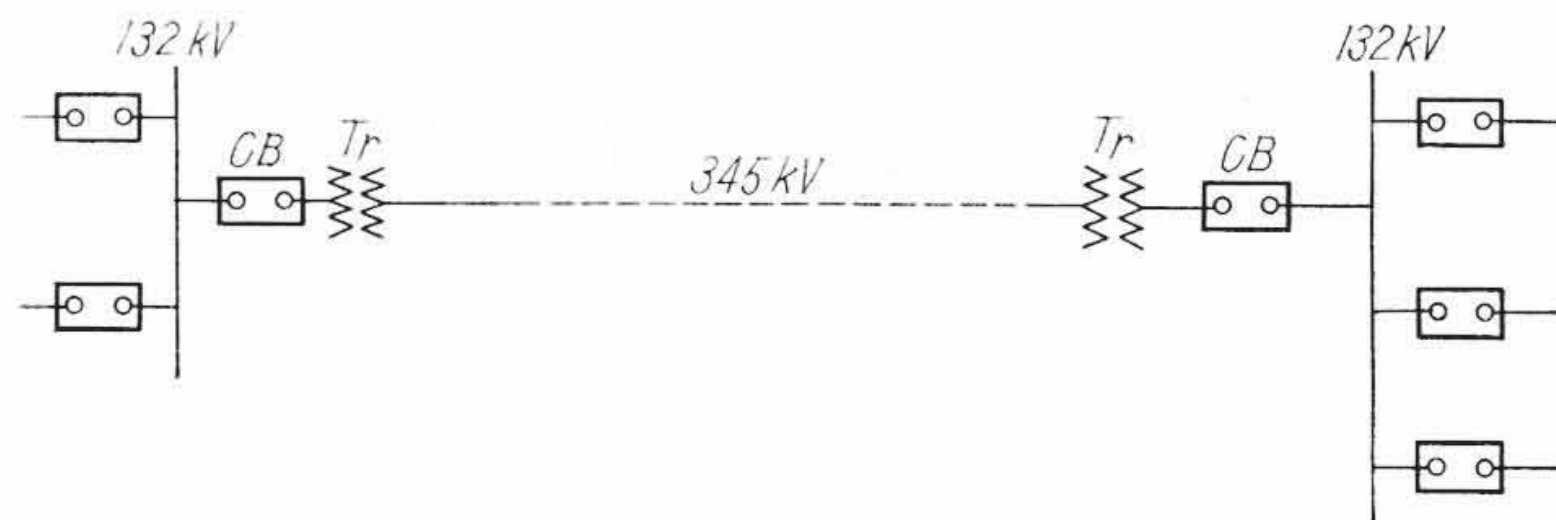
ろもあり、アメリカにおいては将来この方向に進むものと思われる。また変圧器の相数は連系電圧 130 kV 以下の変圧器では三相器を採用しているところもあるが、単相器が圧倒的に多い。これは三相器の場合ブッシングの相間絶縁距離が十分にとれないことや、同一バンク容量を形成する場合輸送上有利であるばかりでなく、予備器を設置する場合はるかに経済的であるなどの理由によるものである。

単器容量の決定は送電線の容量、変圧器の輸送条件などによるところが多く、現在のところドイツ RWE の単相 220 MVA が最大で 100 MVA 程度のものが多い。

単巻変圧器のインピーダンス電圧は 7～10% 程度で、自己容量に換算すると 16～24% になり概して大きい。インピーダンス電圧を大きくするのは系統が大きいと短絡電流を抑制することが切実な問題となったためであろうが、変圧器を小形軽量化し組立輸送を可能にすることにも大いに貢献している。

単巻変圧器の衝撃電圧特性は、直列巻線と分路巻線との接続点における対地電位上昇、直列巻線と分路巻線との電位分布などが二巻線あるいは三巻線変圧器と趣を異にしており、巻線やタップの絶縁などに特別な考慮が払われているが、また一方各巻線の保護やタップの引出位置などについてもいろいろな考え方があり、第 2 図に示すように技術的、経済的見地から各国、各メーカーによりまちまちである。たとえば巻線保護方式を見ても、ドイツ、アメリカでは直列巻線、分路巻線ともに避雷器で保護しているが、フランスでは 220kV 側分路巻線は送電網が大きく電圧上昇も少ないというので、避雷器を使わずギャップで保護している。

変圧器による電圧調整方式も無負荷タップ切換方式、負荷時タ



第 3 図 一回線の場合の送電系統

ップ切換方式のどちらも採用されているが、負荷時タップ切換方式の場合、主巻線にタップを設ける直接式は、組立輸送の限界、絶縁の複雑化、タップによるインピーダンス電圧の変化など不利な点もあるので、400 kV 級では現在のところまだ採用するまでに至らず、中性点側に電圧調整器をそう入する方式あるいは 200 kV 側に直列変圧器をそう入する間接方式を採用している。またドイツの 220 MVA 変圧器以外はすべて主変圧器とは別設置で、電圧調整器を除いても単独で運転できるようになっている。

スウェーデンでは軍事上の見地から変圧器を地下あるいは半地下室に格納する場合が多く、地下室の空間を小さくするため 400 kV ケーブル直結方式が発達している。

3. 遮 断 器

日本の 400 kV 級では、操作時間、充電電流遮断、保守などの点から、全面的に空気遮断器が使用されるものと思われる。空気遮断器は、単位遮断点を電圧に応じて増加すれば、操作時間の延長もほとんどなく、高電圧大容量のものができる。遮断容量としては 20,000 MVA 以上を要求されるであろうが、その達成もきわめて容易である。高速度再投入はルート当りの重要度が増加するので、さらに必要度は増すが、消イオン時間の関係から、現在の JEC 標準 0-0.35-1CO の動作時間程度で十分と考えられる。最近問題とされる、キロメートル故障については、短絡電流が低電圧の場合にくらべて増加しないので、線路の電圧降下分に従って、初期振幅率は低く遮断性能に対する影響は減少する。

スウェーデンの 400 kV 線は最初のものであったので、小油量がい子形、空気形など数種のものが使われた。

フランスの 400 kV 送電線には、2 点切 5 遮断の小油量がい子形遮断器を使用している。これは、従来の 220 kV 用 1 点切遮断部を 2 個組合わしたものであって、特にその宙つり形のもの基礎がなく、超高圧用としては最も廉価なものであるが、性能的には必ずしも満足していない。ただしその 300 kg/cm² の油圧操作機構は、特長のあるものである。

イギリスの 275 kV 遮断器は、3 種類の空気遮断器が使用され、いずれも気中断路部付で 0.4 秒再投入の仕様となっている。

アメリカの 345 kV 送電線は油タンク形が使用されている。しかし次の超高圧にはほかの形の遮断器が使用されるであろう。BPA. Common Wealth Edison など現在 1 回線で送電を行っているところでは、第 3 図のように、345 kV 側には遮断器を入れず、変圧器の低圧側の遮断器で送電線を保護する方式を採っている。変圧器の差動リレー保護に対しては、Transfer Trip を行う。このように簡易な方法を採用しているのはかなりの容量の既存の並行回線があって、現在の重要度がまだそれほどになっていないものとも考えられる。将来、多数回線増設のときには高電圧側に遮断器がはいることになっている。

一般にヨーロッパの設計には、一見して風圧、地震に対する機械的強度を十分に取ったものは少なく、日本のように自然の条件のきびしいものとはだいぶ趣を異にしている。

4. 断 路 器

断路器は、従来から採用してきた水平二点切のものが最も機械的にバランスがはずれており、超高圧にも適した形である。その外部端子は完全な固定で外界の影響を受けることが最も少ない。日立製作所では、この NHL 形で 400 kV 断路器を試作し、種々の性能試験を行った。取付場所の制限のある箇所にはパンタグラフ形も一考の価値があり、水平一点切の形も、重量少なく、NHL 形と同様に操作が軽い点において特長がある。しかし、これらの断路器は、外部端子が固定されていないため、リード線の形や支持については、風圧に対して十分安定するよう考慮する必要がある。ヨーロッパでは、水平一点切のものが圧倒的に多く、油圧操作が広く行われている。操作速度もきわめておそく、1 分以上のものもあり、日本とは比較にならぬほどおそい。もちろんそのようなものにおいては、励磁電流や小充電電流の開閉はまったく考えていない。アメリカでは、断路器はもっぱら垂直切りが使用されている。その理由は占有面積の節約ということであるが、多分に習慣的なものと考えられる。垂直切りは機構が複雑であり、構造部分特にかい子にかかる荷重が大きいので、超高圧に対しては経済的とはいいいにくい。

5. 絶縁協調と避雷器

超高圧変電所機器の絶縁レベルの基準は、各国とも大体避雷器によっている。400 kV 級の BIL の値は、全絶縁に対して一段落した程度であったが、最近では、避雷器の発達と、系統電圧の異常上昇抑制を考慮することにより、さらに、低下することが考えられるようになった。しかしこれには変圧器の絶縁劣化に対する裕度を取る必要があるなどの見地から、おのずから限度があるものと考えられる。

400 kV 級以上の送電線では、複導体が使用されサージインピーダンスが低く、衝撃放電電流も増加するので避雷器は一般に 10 kA 放電時の制限電圧をもって基準としている。制限電圧と BIL との差はそれぞれの国によって異なり、15 % より 35 % であるが 20 % 程度とするのが妥当と考えられる（第 1 表 参照）。開閉サージの避雷器に対する考え方は、ドイツ、スウェーデンでは、変圧器励磁電流開放時の小勢力サージの抑制のみを期待し、アメリカ、フランスでは、送電線充電電流の開閉サージの吸収をも考えている。充電電流の開閉サージェネルギーは、電圧、亘長とともに著しく増加し、400 kV 級においては衝撃放電時よりも大きくなるのが普通である。前の場合では避雷器の中間周波放電耐量は 150～250 A で十分で、従来の自然消弧形の直列間隙の避雷器で処理することができたが、後の場合には 500 A 以上が必要であって、強制消弧形の避雷器が必要である。

最近においては、本号別論文にあるように、1,000 A 以上の中間周波電流をほとんど、寿命回数の制限なしに、放電可能な避雷器が製作されるようになったので 400 kV 級に対する開閉サージによる絶縁の脅威はほとんど除かれたといえることができる。

第 1 表 超高圧送電線絶縁レベルおよび保護方式

	電圧 (kV)	衝撃絶縁 レベル (kV)	避雷器制 限電圧 (kV)	保 護 Ry	再 投 入
RWE (ドイツ)	380	1,450	1,156	距離 Ry 4 段, 過電圧保護	三相 1.2"
Gennessia-Paris (フランス)	380	1,650	△ 1,200	距離 Ry 2 段, 故障相選択 Ry	単相 1～2"
Kilfolsen-Hamula (スウェーデン)	380	1,775 (1,460)	△ 1,180	距離 Ry	三相 0.4"
Common W. Edison (アメリカ)	330	1,050	△ 870	距離 Ry	三相 23～
BPA (アメリカ)	330	1,175	870	位相比較 Ry 距離 Ry	三相 30～
BCEC (カナダ)	330	1,175	870	位相比較 Ry	ナ ジ
CEGB (イギリス)	275	1,050		位相比較 Ry	※(三相 0.44")

注：※ 計 画 中 △ NEMA Std. 換算値

6. 故障保護方式

第 1 表に各国の超高圧の代表的送電線の保護方式の大略を比較した。400 kV 級なるがゆえの特別の変ったものは見られず、保護リレーは電力方向比較に距離リレーを併用したもの、位相比較とインピーダンスリレーを併用したものなど、国状によっていろいろである。西ドイツ RWE 送電線の場合は距離リレーを 4 段に使用して、万全を期しているが、イギリスのスーパーグリッドでは位相比較キャリアのみを使用し、はなはだしい場合は OC リレーだけで済ましているところもある。

スウェーデン、ソ連では長距離の送電線リアクタンスを補償するため、直列コンデンサを使用しており、それに関連した保護リレーの誤動作をさけるために、種々の対策が講じられている。日本の 400 kV 級送電線では直列コンデンサの必要性はきわめて薄いものと考えられる。

送電線負荷は、一般に日本より余裕があり、また必ず並行回路があるので、高速度再閉路の時間は極度に速いものはない。無電圧時間決定の大きな要素である消イオン時間は送電電圧に比例して増加し、また他線からの誘導電圧、および故障電流の大きさによっても著しい影響を受ける。他の線からの誘導電圧は線路区分間の長さに比例するので、無電圧時間がある限度以下に短縮しようとするれば、途中の開閉所の数を増すことになりかえって不経済となる場合もある。アメリカの AEPC では、345 kV 系に 28～三相再閉路を実施しており、将来検討結果によって 23～に短縮することを考えている。単相再閉路を行っているのはフランスのみであって、400 kV 送電線に 0.4～3 秒の再閉路装置をつけているが、実際には 1～2 秒で実施している。これは従来 220 kV 系統に採用して実績のあった方式を取入れたものである。イギリスでは、再閉路は未実施で目下 0.44 秒程度のものを検討中である。カナダの BCEC 345 kV 送電線では再閉路は雷がはなはだ少ないので考えられていない。

日本の 400 kV 級送電線には、日本の実情に最も適合した保護方式が採用すべきことはもちろんであるが、なるべく簡素で信頼度の高いことに重点を置いて検討されるべきである。