

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第7回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回は電力系統流通設備のうち地中送電設備の解説をします。
夏休み？につきやや短めの解説とさせていただきます。

○地中送電設備の基本構造

・ケーブル

ケーブルは主に、電気を流す導体、導体の電圧と地面電圧間の絶縁を維持する絶縁体、ケーブルの表面を守るシースから構成されます。(図-62)

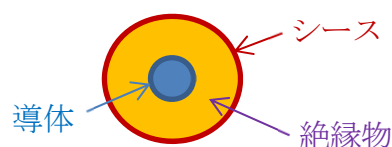


図 62 ケーブルの基本構造 (単相型)

なお、絶縁体は、送電設備に使われるような比較高い電圧レベルでは、紙、油、(架橋)ポリエチレン等です。

交流ケーブルでは 3 相まとめた構造とする場合と、1 相 (単相) ずつの構造とする場合があります。

・ケーブル設置設備

ケーブルは相当な重量物となるため、地中敷設が一般的です。諸外国では、特に設置するための設備は設けずそのまま埋める (直接埋設) ことも多いですが、日本では何らかの入れ物に入れるのが通常です。高電圧の場合 (10 万 V 以上のイメージ)、設置設備又はスペースを専用に設けます。この設備が管の場合は管路、トンネルは洞道と呼ばれます。(図-63) なお、洞道は、上下水道等と併せて施工されるタイプ (共同溝) もあります。

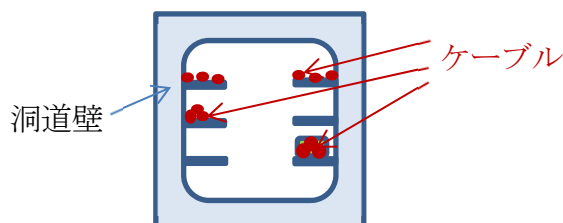


図 63 ケーブル設置設備 : 洞道

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ケーブルは、ある長さ毎（長さは電圧等より異なる）に接続してゆきます。ケーブルの引き入れ・引き抜き、接続の作業スペースや接続設備スペース、通電時のケーブルの伸縮を吸収するスペースを確保した設備をマンホールと呼びます。道路表面をよく見ると「マンホールの蓋」が見えます、地中のマンホールは「蓋」より遥かに大きなスペースを占め、建設コストも相応に要します。

(余談) 直埋は工事費が安いけれど

発展途上国の大都市に行くと道路掘削工事現場でケーブルが掘り出されているのを見かけることがあります。系統運用者に聞くと、道路工事で誤ってケーブルを切断し停電発生、が良くあるとのことでした。直接埋設（直埋）は工事費が相当安いですが、信頼性や安全面から現状の技術レベルではさすがにお勧めできません。となると、地中送電設備の工事費は高い！とのジレンマに陥りますが、是非一層の現場技術開発を期待したいものです。

・ケーブル冷却設備

地中送電で送電容量を確保するため、ケーブルを冷却させる場合があります。冷却方法として、絶縁に使用している油を循環させる、水冷管をケーブルに沿わせる等があり、循環ポンプ等の冷却用付属設備がケーブル設備沿いに一定間隔毎で必要となります。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：メリット

①送電面積が小さい

架空送電線は絶縁に空気を利用するのに対し、地中送電線は絶縁物を使うため電気を送るのに必要な面積は遥かに小さくなります。このため、送電設備ルートを比較的自由に設定することが可能です。

②電界・磁界の影響が小さい

ケーブルは、電気が周辺に及ぼす影響、すなわち、ケーブル周辺の電界や磁界を小さくする様に作られます。（専門的になりますので具体的な説明は省きます）

③雷の影響を受けない

架空送電線設備の様に雷事故は（殆ど）発生しません。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：デメリット

④送電容量が小さい

架空送電線と同じ材質・太さの電線でケーブルを作っても、送電できる電力（送電容量）は小さく、凡そ、1/2 から 1/3 となります。この理由は、ケーブルは電線が絶縁体に覆われているため架空線と比較し熱が逃げにくく、電流を増やすと温度が上昇しケーブルが壊れるためです。このため、ケーブルを冷却する設備を設け送電容量を増やす場合もあります。

⑤事故が自然回復しない

架空送電設備での主な事故原因である雷事故では、空気の絶縁能力は自然に回復して再び使用できる様になりますが、地中送電設備で絶縁物に事故が発生するとその部分の絶縁能力は永久に失われます。その事故部分を取り替えるまでは壊れたままで使えません。

⑥交流送電の場合、無効電力発生量が大きい

特に地中送電設備が長い距離となると（50 km 程度以上）地中送電設備で発生する無効電力発生量（充電電流）が大きくなり、有効電力（kW）の流す能力を阻害します。

なお、交流送電する架空送電設備でも無効電力は発生しますが、同じ電圧で送電する場合、地中送電の数分の1以下と小さくなります。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・充電電流の特徴

交流地中送電設備での充電電流は、電力送電の際に非常に重要な要素となります。このため、以下で少し具体イメージを解説します。

ケーブルは図-64 のとおり電線と地面と同じ電圧のシース間を距離の小さい絶縁物で挟んだ構造となっています。この様な構造に高い交流電圧をかけると、絶縁物の特性によりますが、ケーブルに使用される絶縁物の場合、無効電力が発生する、すなわち、無効電力電流（充電電流と呼ばれます）が流れます。送電距離が長くなるほど無効電力量は大きくなります。(図-65) 結局、交流送電では、絶縁物であっても大きな交流電流が流れるのです。これが直流送電との重要な違いです。

基幹送電電圧（30万V程度）50km程度以上になると、この電流値は、流したい有効電力量に近い値となります。「充電電流」が最終的には有効電力の流せる量を低下させてしまいます。

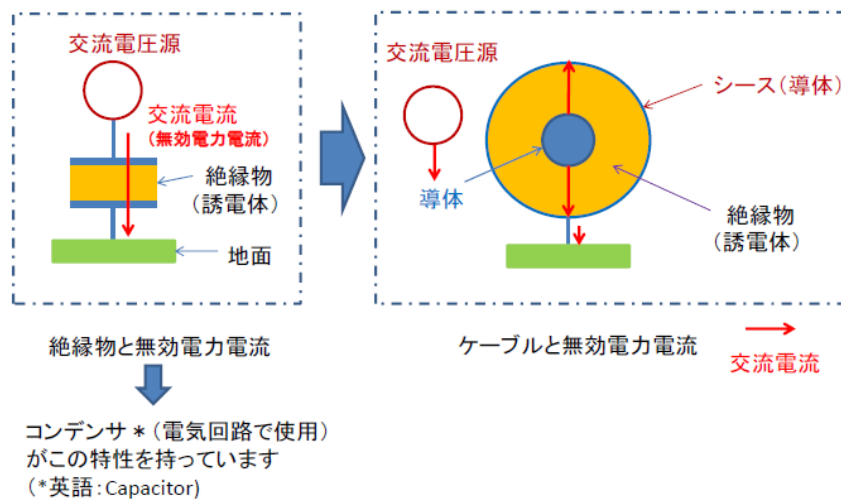


図 64 ケーブルの無効電力電流（充電電流）

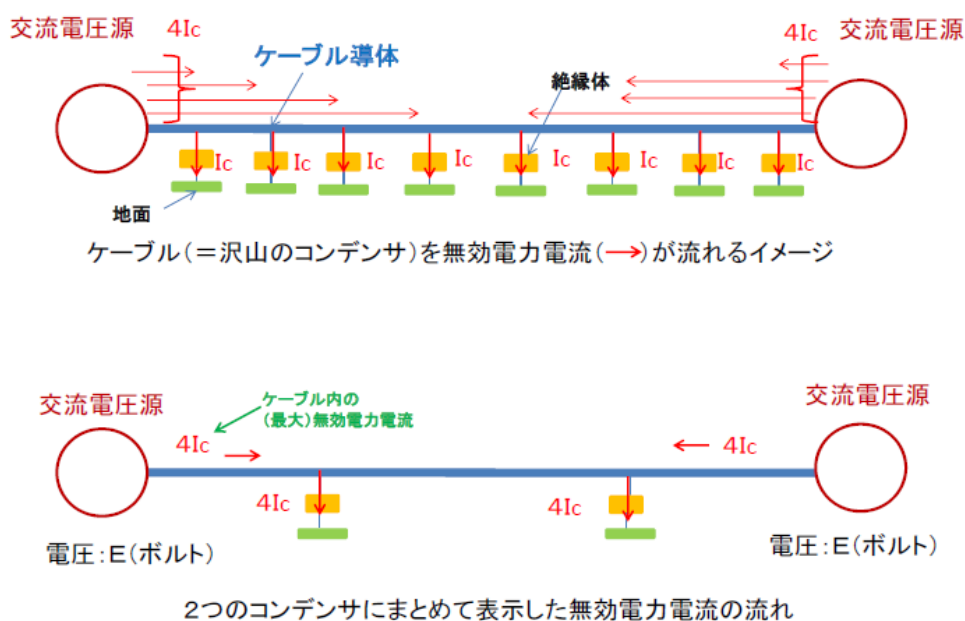


図 65 長距離ケーブルの無効電力の流れ（両端が同電圧の場合）

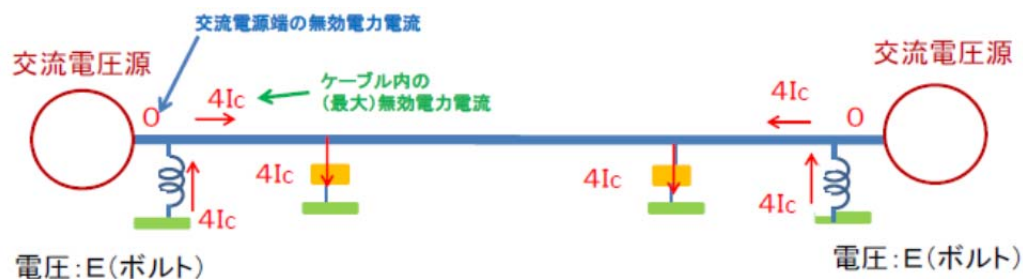
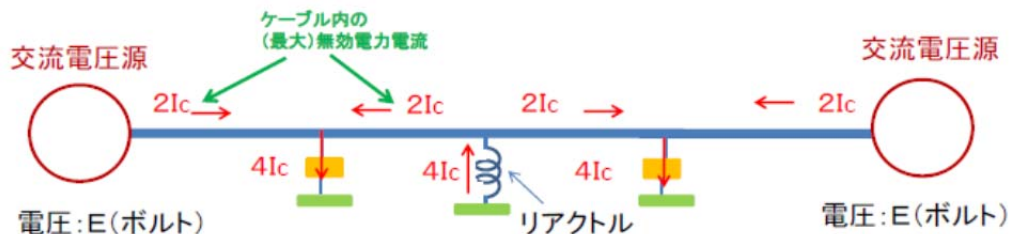
超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・充電電流をコントロールする方法

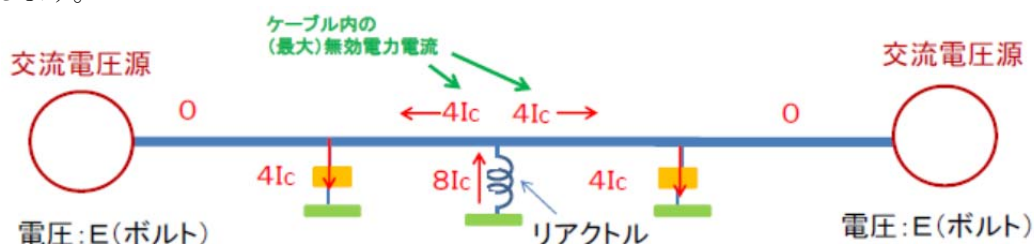
充電電流が発生させる無効電力は、反対位相の電流を発生させれば打ち消すことができます。反対位相を発生させる設備をリアクトルと呼び、図-65 の中間点（中間点 X 点）にケーブルで発生する無効電力電流の半量分のリアクトルを置いた場合を図-66-1 に示します。この場合、ケーブルの無効電力電流とリアクトルの無効電力電流が打ち消し合うため、ケーブルを流れる無効電力電流が減少します。（図-65 ; $4I_c \rightarrow$ 図-66-1 ; $2I_c$ ）

ところで、リアクトルを真ん中ではなく両端（A、B 点）に置くと（図-66-2）、無効電力は交流電源端から見ると完全に打ち消されますが（図で零となっています）、ケーブル内の無効電力電流はリアクトルを設置しない場合（図-65）と同じ $4I_c$ となり、ケーブルを流れる最大無効電力電流は変わりません。この様に無効電力電流を制御し送電容量を確保するにはリアクトルの位置と容量の設定が重要となります。



(余談) 過ぎたるは及ばざるがごとし

さて、図-66-1 から更にリアクトル量を増やし、例えば図-66-3 の様に交流電源端から見て零となる量とすると、電流面でもっと良くなる気がするかも知れません。実際は、同図のとおりリアクトルにつながるケーブル部分に $4I_c$ が流れ、（最大）無効電力電流は図-65 と同じ値になります。電力システムではこの様に状況改善方法を一方的にどんどん増やしていくと、かえって状況が悪化する場合があります。電力システムにとどまらず、「極端に偏らずほどほどが良い」との教訓？が結構あてはまる気がします。



超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

図-66-1 の様に中間点（ぴったり中間でなくても良いですが）にリアクトルのためだけに設備を設置するのは“もったいない”面があります。このため、同様の効果が得られる地点の変電所にリアクトルを設置し、地域への電力供給機能と無効電力制御機能の両方を変電所に持たせる、のが一般的です。なお、技術的には、電圧を制御しても無効電力を制御できるため、それらを含め総合的な無効電力調整が変電所で行われます。これらについては、次回、変電設備で解説します。

・海底ケーブルは充電電流をコントロールできない

さて、海底ケーブルで交流長距離送電する場合、リアクトルを置くこととすると中間点は海底になりますが、余程浅い海でない限りリアクトル設置は非現実的です。（保守等が困難です）このため、送電容量確保のための無効電力制御は実質的に不可能です。「長距離」の目安は 50 km 以上、この場合、電力を交流海底送電することは不可能です。なお、将来、充電電流（無効電力電流）を発生しにくい絶縁物が実用化されれば可能となるかも知れません。

・長距離海底ケーブルは直流送電の独断場

直流送電は無効電力を発生しないため、交流送電に伴う充電電流問題がありません。このため、長距離海底送電は直流を使用します。

・現在の超電導送電は地中送電技術

現在の超電導送電は、マイナス 200 度程度以下に冷却する必要があります。このため、基本的な設備構造は導体（超電導）、絶縁体、それを囲む冷却媒体、外部の熱が内部に入らないための熱シールド体の構成となります。この基本的な構造は地中ケーブルと同じになります。

なお、地中送電線は電気を流すと導体で熱が発生し、冷却をかけて送電容量を増加させる場合がありますが、超電導送電では外部から熱が電気の流れに関係なく入ってくるため（侵入熱）、冷却が必須です。

冷却するとエネルギーを消費しますから、超電導送電でも送電（するための）エネルギー損失が発生することになります。ケーブルに電気を流すとエネルギー損失が発生しますから、結局、超電導送電は地中送電技術として技術評価や経済性評価を行うのが妥当と思います。

なお、超電導送電は冷却が必須なため、海底に冷却設備を確保するのは困難ですから（リアクトルと同じ理由）で長距離海底送電には適しません。

一方、超電導送電は地中送電の“仲間”ですが、送電損失が冷却エネルギーだけで電流の大きさに関係しない特長がありますから、大電流を流せる超電導線ならば、低電圧で大電力送電が可能となります。従来の電力送電では、電流を大きくすると、エネルギー損失が大きくなるとともに電線の加熱への対応が困難となるため、大電力を送電する場合、高電圧として必要な電流を減らしました。この面では、同じ地中送電でも異なる発想での活用が考えられます。なお、交流低電圧送電は、交流高電圧送電と比較して充電電流の影響が小さくなり有効電力を送りやすくなる効果もあります。この様に、超電導の特長を踏まえて、総合的な視点から導入検討を進めていくのが良いと思います。

なお、以上は「現在の」超電導送電技術に対する評価ですが、将来、常温で超電導となる材料が発見され送電技術が確立されれば、冷却が不要となり全く違う活用の仕方が出てくるでしょう。

(余談) 技術者は夢をどう実現させる？

超電導は「夢の技術」と言われてきました。ただ、送電分野では、現状、冷却が必須ですので数々の技術的な制約が生じます。その様な制約を前提とし現実的な「夢を語るか」、あくまで「常温（室温）超電導と言う究極を追いかけるか」が技術者として思案のしどころとなります。近い将来の実用化を考える「工学的な」技術者は、現代社会への適用を前提に夢を追いかけるので、前者の考え

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

に立つと思いますが、その分、夢のスケールが小さくなるジレンマがあるでしょう。どのような分野でも、工学技術者は「大きな夢」と「現実的な夢」の狭間で悩むと思います。

・地中送電設備により電力系統増強を進める場合の注意点

地中送電設備は、通常、道路下に（占有し）敷設しますから、道路計画との調整が重要になります。需要密度が高くなることが予想されるエリア（いわゆる都市化地域）では、都市計画、その中では当然、道路整備計画も含まれますが、と整合をとりながら管路や洞道の整備を進めるのが合理的です。

ただ、都市計画も適宜見直されますから、送電設備の整備に際しては、柔軟性を持たせておく必要があります。一方、柔軟性を持たせると「種々な対応をとれるための「余力」を持たせることとなり、建設コストは増加する可能性があります。このため、ある程度経済性を踏まえた割り切りも必要となります。なお、道路は整備されるとしばらくの間（5年程度）、再掘削できなくなりますから、これを踏まえ先行投資的な判断も（どうしても）必要となります。これらを総合判断するには相当の実務経験が必須です。

(余談) 地中送電設備と架空送電設備はどちらが経済的？

配電設備では、架空設備（電柱を経由した配電）が地中設備より建設コストは安価になりますが、送電設備では、架空 vs 地中について単純に言い切れないと思います。特に都市化が想定されるエリアでは、架空送電と地中送電の双方のメリットを総合的に比較検討する必要があります。

例えば、架空送電設備は、用地確保面等から建設可能な場所が限られますから、ルート近辺で変電所設置を想定すると変電所から需要地帯までの流通設備コストが大きくなり、地中線設備で需要地帯に中心へ送電し、線路近傍に変電所を設ける方が総合的に見た経済性が勝る場合も有ります。

(図-67 のイメージ) 特に、発展途上国での大都市電力送電は都市化がどんどん進んでいきますから、ダイナミックな発想が必要です。

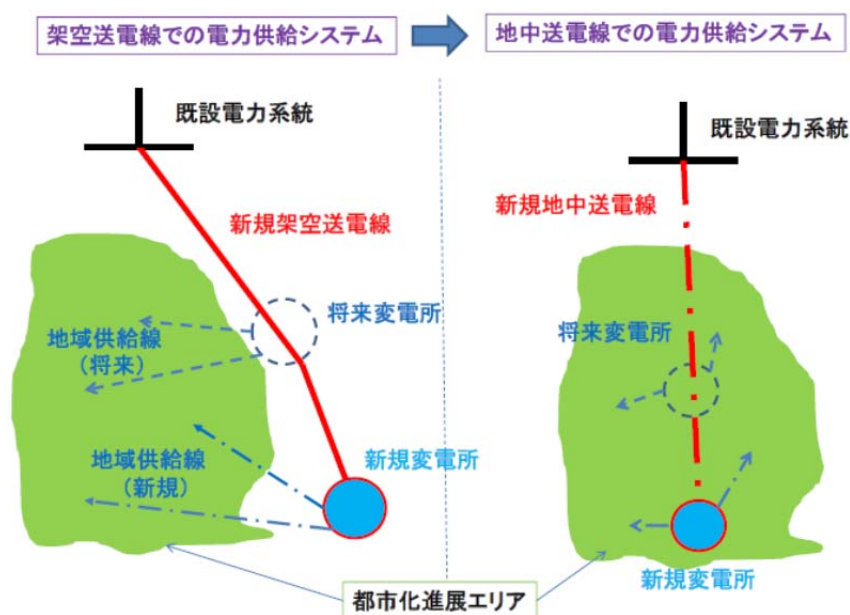


図 67 地中線設備が経済的に合理的な例 (イメージ)

今回はここまでとし、次回、変電設備について解説します。