地中送電線의 大容量化 技術

박 대 희
원광대학교 공과대학 교수

1. 序論

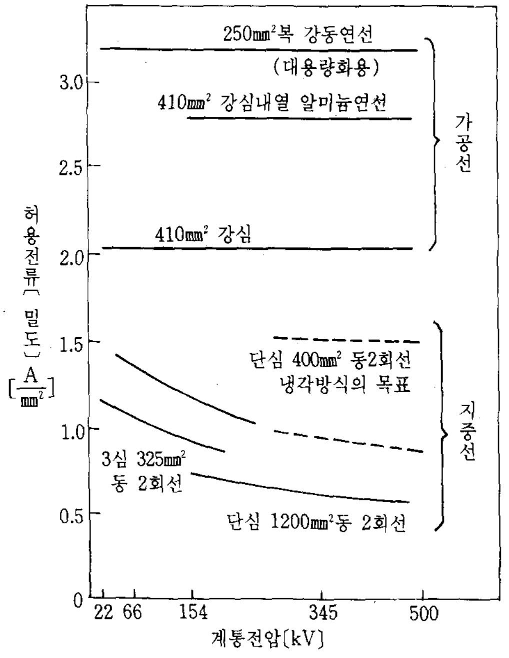
최근, 경제발전과 함께 전력수요의 증대와 신도시 건설에 의한 전력의 집중화는 계속적으로 증가의 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 전력수요에 대응하기 위하여 전력의 대용량 생산과 대용량 송전이 시급하게 요구되고 있다. 여기에서는 대용량 송전을 위한 지중송전케이블을 중심으로 대용량화 기술에 관한 기술을 언급하기로 한다. 송전선의 대용량화 방법으로서는 고전압화와 전류용량의 증대로 구분할 수 있다. 이 가운데 고전압화는 154kV, 345kV, 765kV로 이미 사용전압이 결정되어 있으며, 일본의 경우는 1000kV 송전도 검토, 실용화중에 있다. 지중송전선의 대용량화는 각각의 사용전압에 따라 전류용량의 증대책으로 여러가지 방법이 있으나, 각각의 장단점 및 문제점들이 있어 부분적으로 적용되고 있으며, 아직은 연구개발중인 경우가 많다.

본 기술에서는 지중케이블 중에서 22kV 및 154kV급 케이블을 중심으로 최근의 대용량화 방법에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 전류용량증대의 방법과 문제점에 대하여 간단히 설명하고, 대용량케이블로서 필요용량과 적용장소에 따라서 어떤 방법을 채용하는 것이 적절한가, 또한 현재 사용하고 있는 초고압케이블의 문제점을 어떻게 해결할까에 대해서도 기술하기로 한다.

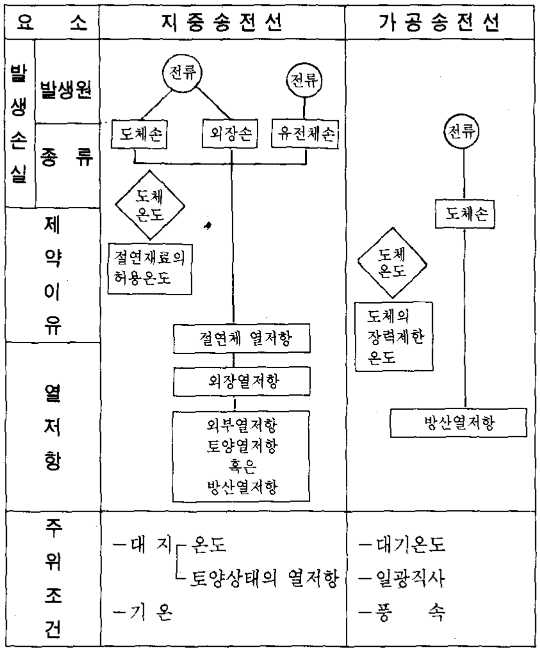
2. 케이블의 電流容量 增大方法

지중케이블의 전류용량은 가공선의 전류용량에 비해서 동일 굵기의 도체에서는 크게 감소한다. **그림 1**은 허용전류밀도의 예를 나타낸 것으로, 사용전압이 높을수록, 또 도체가 굵을수록 그의 차는 커지고 있다. 케이블과 가공선의 전류용량을 제약하는 원인은 다음과 같은 요인이 있다. 또 송전선의 허용전류를 제약하는 요소를 요약하면 **그림 2**와 같이 나타낼 수 있다.

케이블의 경우는 절연재료가 열열화하지 않는 최고온도를 기초로 하여 통전전류에 의한 도체손, 케이블외장의 손실, 과전전압에 의한 절연체손실 등이 있고, 또 열의 방산을 제한하는 열저항, 절연체열저항, 외장열저항, 외부열저항 등이 있어, 가공의 나선에 비해서 동일전류에서 발생열이 많고 방산이 어렵다. 더구나 유전체손실은 사용전압이



<그림 1> 가공 · 지중송전선의 전류밀도의 차이



<그림 2> 송전선의 전류용량을 제약하는 요소

높을수록 커지고 또 전압이 높을수록 절연두께가 두꺼워지므로, 그의 열저항도 크게 되어 허용전류가 제한되는 악조건이 겹치게 된다. 따라서 이들의 악조건을 제거하든지 적게 하는 대용량화의 방법이 있다.

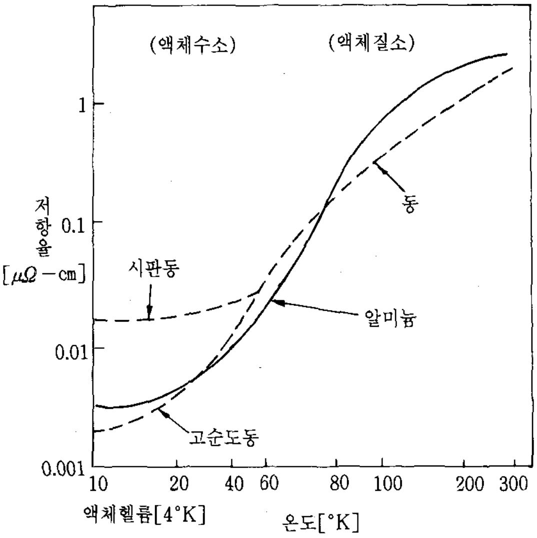
가. 損失의 低減方法

송전중에 케이블내에서 발생되는 손실은 도체와 절연체에서 나타난다. 이와 같이 재료적인 측면은 전압, 전류, 주파수에 의한 것으로 여기에서는 전류에 의해서 발생하는 도체의 통전손실과 전압에 의해서 발생하는 절연체의 유전체 손실에 대하여 언급하고자 한다.

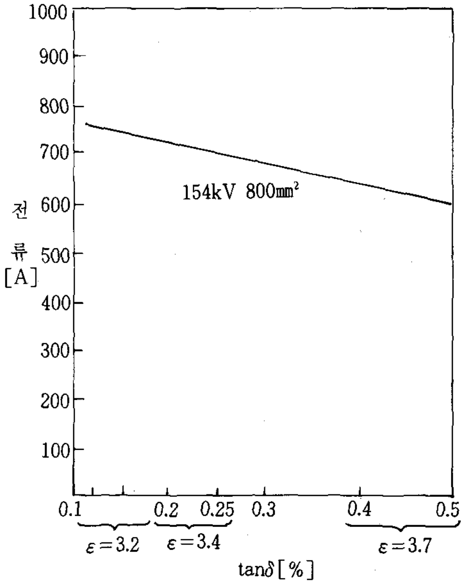
(1) 通電損失(I^2R)의 低減方法

통전손실을 저감하는 방법으로서는 도체저항을 작게 하면 좋다. 도체의 단면적을 크게 사용하면 R이 작아지지만, 경제적인(원가의) 한계가 있고 케이블 제조상의 제약과 함께 운반상, 공사상의 문제가 있다. 케이블 도체의 제조는 2500~3000㎟도 가능하나 실용상의 한계는 2000㎟ 정도이다. 예외로서 외국의 경우 관로기중송전의 13000㎟도 있으나 이것은 알미늄pipe를 사용한 것으로, 케이블 도체인 연선구조와는 다르고 12~13m 정도의 Unit를 공사현장에서 접속하는 것이다. 이와 같은 대용량의 관로기중선로는 일본의 경우 500kV급, 8000A정격의 3심형케이블(철시즈 외경 : 1200㎜ϕ, 알미늄도체 외경 : 230㎜ϕ, 두께 : 20㎜)이 사용되고 있다.

다음에는 도체의 저항을 적게 하는 방법으로 상온에서 케이블을 사용하지 않는 경우의 예를 **그림 3**에 나타냈다. 도체의 저항이 액체질소온도(77°K)에서 약 1/10로 되는 영역, 더욱이 액체헬륨(4°K)에서 약 1/1000로 되는 영역에서 케이블을 사용하는 것, 즉 극저온케이블이나 초전도 케이블



<그림 3> 극저온에 있어서의 전기저항의 변화



<그림 4> tanδ와 송전용량

도 있으나 아직 실용화에는 많은 해결해야 될 문제가 있다.

(2) 誘電體損의 低減方法

케이블은 절연을 위하여 고체 절연체를 사용하는 것으로 절연체내에서 전압에 의한 유전손실이 일어나 절연체가 가열되어 결국 케이블의 허용전류가 저하되는 현상이 일어난다. 케이블의 유전손실은 다음 (1)식에 나타낸 바와 같이 정전용량 C, 선간전압 E와 tanδ에 비례한다.

$$Wd = 2\pi fC(E/\sqrt{3})^2 \tan\delta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

단, Wd : 유전체손실　　E : 선간전압[V]
f : 주파수[Hz]　　tanδ : 유전체정접
C : 정전용량[F/㎞]

또 케이블의 C는 다음 (2)식에 나타낸 바와 같이 절연체의 유전율과 케이블의 절연두께에 관계된다.

$$C = \frac{1}{9} \cdot \frac{\varepsilon}{2\log_e D/d} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

다만, ε : 유전율, D : 절연체 외경, d : 절연체 내경

이들 가운데, 유전체손실은 전압의 2승에 비례하여 커지는 것으로 초고압 이상의 케이블에서는 문제가 된다. 이 때문에 ε과 tanδ가 작은 절연체를 사용하여야 할 필요가 있으며 ε과 tanδ의 관계를 154kV 케이블의 경우를 예로서 **그림 4**에 나타냈다. 이 그림을 보면 전압이 높아지면 케이블의 전류(송전용량)저감은 현저하게 나타나는 것으로 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 ε과 tanδ를 작게 한 대표적인 예가 합성지 절연케이블이고, 또 절연지와 오일을 전혀 사용하지 않는 다른 절연체를 사용하여 ε과 tanδ를 작게 한 것에 SF_6가스를 사용한 관로기중케이블이 있다. 유전손실을 없애기 위한 방식으로 교류 대신에 직류송전이 있으며 유럽과 일본에서는 섬과 내륙간에 장거리 해저용 직류송전을 실용화하여 사용중에 있다.

나. 發生熱을 除去하는 方法

지중케이블의 대용량화는 발생되는 열을 저감시

키는 것으로 케이블 자체의 열발생 억제와 포설방법의 개선을 통하여 열방산을 쉽게 하는 것과 강제냉각에 의한 발생열을 억제함으로써 대폭적인 개선을 할 수 있다. 다음에는 케이블의 절연재료적인 면과 포설방법, 강제냉각에 의한 대용량화에 대하여 기술한다.

(1) 열저항을 줄이는 방법

케이블의 발생손실을 작게 하는 한편, 열을 대기중이나 지중으로 쉽게 방열시키는 방법이 있다. 열의 방산을 방해하는 각 부분의 열저항을 계산하면 절연체 열저항과 외부열저항이 대부분은 큰 것을 알 수 있다. 전자는 전압의 상승과 함께 증가하며 이것은 절연체의 두께에 관계된다. 이 저감에는 열을 전달하기 쉬운 절연재료를 개발하든가, 내전압성능이 우수한 재료를 개발하여 절연체의 두께를 얇게 하는 방법밖에 없다. 저열저항의 절연체에 대해서는 합성절연지나 에폭시수지를 연구하여 합성지가 개발됨으로써 두께의 저감효과도 기대되나, 내전압성능 특히 Impulse전압의 향상에 문제가 있다.

케이블의 외부열저항을 작게 하기 위해서는 저열저항의 Back-fill을 이용하든가 주변조건을 바꾸어 동도내 포설하는 방법이 있다. 전자는 경제성이 없어서 실용한 예가 없으며 후자는 변전소의 인출구 등 많은 케이블이 포설되는 경우에 많이 적용되는 것으로 공기의 환기를 병용하여 이용하는 경우도 있다.

(2) 강제냉각에 의한 발생열을 없애는 방법

강제냉각은 송전용량을 증대하는데 가장 효과적인 방법이나 여러 가지 방식이 있고 각각의 장단점이 있다. 케이블을 외측에서 냉각하는 방법을 외부냉각이라고 말하며, 절연체와는 직접적인 관계가 되지 않기 때문에 사용전압에 무관하게 채용할 수 있는 장점이 있다. 냉각방식은 외부간접과 외부직접냉각으로 구분되며, 열의 발생원이 되는 도체에 대해서는 간접적이다. 외부간접 냉각방법은 포설된 케이블의 주위에 냉각관을 설치하는 것으로, 이 경우 송전용량의 증가율은 10~40% 정도이며 지중송전선의 부분냉각에도 적용된다.

외부직접 냉각방법은 케이블을 냉각관속에 넣어서 냉각시키는 것으로, 이 경우에 송전용량의 증가율은 50~70%를 점유하는 외부 열저항이 제거되며 외장손실도 직접 열 교환되어 포설조건에 따라서 송전용량을 2배로 증대시킬 수 있다. 또 많은 케이블이 포설되는 경우에도 타회선의 영향을 무시할 수 있다는 큰 장점이 있다. 내열성이 좋은 절연체를 사용하여 케이블의 연속사용온도를 향상시킨 케이블과 냉각기술과 병행한 연구가 기대되고 있다. 냉각효과를 높이기 위해서는 케이블의 중심도체를 직접 냉각하는 방법이 냉각으로서는 효율적이다. 도체내부의 냉매 통로가 작으면 압력강하가 커지며 많은 유량이 흐르지 않게 되므로 가능하면 큰 냉매 통로가 필요하다. 내부직접 냉각방식의 경우는 조장이나 냉매온도·유량 등의 조건에 의존되나 5~10배의 용량을 증대시킬 수 있다. 일반적으로 단조장의 선로에 효과적인 방식으로 접속부를 이용하여 냉매의 인입구를 설치할 수 있다면, 장조장의 선로에도 적용 가능하다.

22kV의 CV(가교폴리에틸렌)케이블에서 냉매로 순수를 사용하는 것과 66kV의 CV에서 냉매로 오일을 사용한 것에 대해서는 장기시험이 실시되고 있다. 전자는 발전기의 인출구에서 상분리모선을 대신한 케이블로서, 후자는 초고압변압기의 3차측의 조상설비회로용으로서 사용이 검토되고 있다.

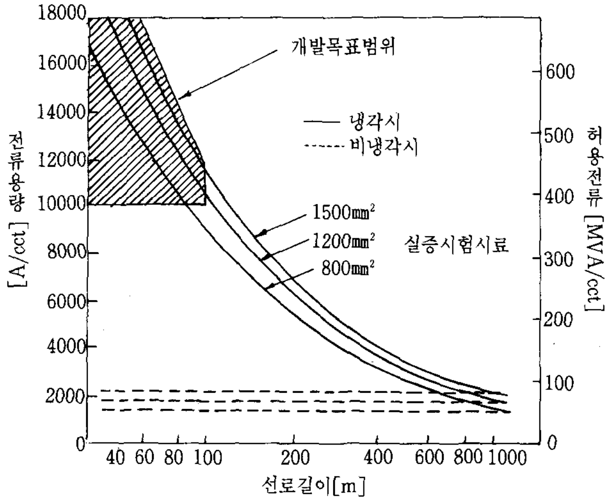
22kV급 내부 수냉각케이블의 조장과 사이즈, 전류의 관계를 **그림 5**에 나타냈다. 이 방식은 냉매의 순환냉각계와 냉매인입구의 신뢰도향상이 실용상의 Point이다. 이 그림을 보면 단조장에서 전류용량의 증대효과를 크게 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며 많은 연구가 기대된다.

통상의 OF케이블의 유통로를 굵게 하여 OF오일의 순환냉각을 실시하는 방법도 검토해볼 수 있으나, 동Pipe를 사용한 내부냉각의 CV와는 달리 Spiral관을 사용하고 있다는 점과, 오일의 점도가 낮아서 순환Pump의 마모분이 문제이며 Sheath Loss도 큰 것으로, 외부직접냉각과 함께 검토가 되고 있으나 아직 실용화의 예는 없다.

최근에는 냉매로서 액화프론을 사용하는 것에 대해서도 장기시험이 계획되고 있으며, 또 액화질소를 사용한 극저온케이블, 액체헬륨을 사용하는 초전도케이블에 대해서도 기초연구가 지속적으로 수행되고 있는 실정에 있다.

다. 許容溫度를 올리는 方法

앞에서 기술한 바와 같이 절연체의 열열화를 일으키지 않는 온도에서 도체의 사용허용온도가 정해지고 있으나, 내열성이 좋은 절연체를 사용하여 도체사용온도를 올리는 방법도 있다. 케이블의 연속사용온도는 OF케이블은 80℃, CV케이블은 90℃, 관로기중은 90℃이나 합성절연지를 사용하면



<그림 5> 22kV 내부수냉 CV케이블의 전류용량

110℃ 정도까지 연속 사용 가능한 것으로 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 적절한 설계와 절연시스템이 필요하고 현재 개발중에 있으며, 열방산·주변온도에 관련하여 외부직접수냉과 함께 검토되고 있다. 이상의 대용량화의 방법을 정리하면 표 1과 같다.

3. 損失低減上의 問題点

가. 절연재료

케이블의 절연두께는 선로에 상정되어진 충격전압과 개폐서지 및 사용전압에서 30년 정도의 수명에 견디는 설계가 되어야 하고, 초고압 이상 케이블의 경우는 유전체손실이나 충전전류의 영향을 저감하기 위하여 정전용량도 고려해야 한다. 일반적으로 케이블은 고전압이 됨에 따라서 절연재료의 절연파괴강도를 높게 하지 않으면 절연두께가 비례하여 두껍게 되고 두터운 케이블로 된다. 따라서 케이블의 절연재료는 장기간 사용하여도 tan δ에 나쁜 영향이 미치지 않는 필요조건이 요구되고 있다. 특히 초고압케이블에 있어서 절연두께는 충격스트레스(Impulse)와 AC상용스트레스 가운데 가혹한 쪽으로 결정되며 회로조건에 따라서 적절한 절연두께를 선정해야 한다.

나. 접속부의 열적문제

케이블의 조장은 일정한 길이로 한정되며, 따라서 장거리 지중송전선로상에서는 항상 접속부가 존재한다. 이와 같은 지중선로상의 접속부는 케이블의 송전용량 손실에 큰 영향을 미치는 것으로 많은 검토가 되고 있다. 특히 접속부의 열적문제는 이미 영국에서 OF케이블의 강제냉각에 대한 연구가 진행되고 있는데, 접속부의 온도상승은 케이블에 비해서 4~10℃ 높다. 따라서 선로의 송전

<표 1> 지중송전대용량화의 방법

<table>
<tr><th colspan="5">대 용 량 화 의 방 법</th><th>적 용 예</th></tr>
<tr><td rowspan="12">허용전류를 증가시킨다</td><td rowspan="5">발생손실을 작게 한다</td><td rowspan="3">통전손실을 작게 한다</td><td rowspan="3">도체저항을 낮춘다</td><td>도체를 굵게 한다</td><td>대도체케이블, 관로기중송전</td></tr>
<tr><td>저온으로 한다</td><td>극저온케이블</td></tr>
<tr><td>초전도금속을 사용함</td><td>초전도케이블</td></tr>
<tr><td rowspan="2">유전체손실을 작게 한다</td><td>tanδ, ε를 작게 한다</td><td>절연재료를 바꾼다</td><td>관로기중송전, 합성지절연케이블</td></tr>
<tr><td>직류송전한다</td><td></td><td>직류케이블</td></tr>
<tr><td rowspan="6">발생열을 제거한다</td><td rowspan="3">열저항을 낮춘다</td><td colspan="2">주변조건을 바꾼다</td><td>동도내포설케이블</td></tr>
<tr><td colspan="2">저열저항절연체를 사용한다</td><td>합성지절연케이블</td></tr>
<tr><td colspan="2">내전압특성이 좋은 재료로 절연두께를 얇게 한다</td><td>유침지절연케이블</td></tr>
<tr><td rowspan="3">강제냉각한다</td><td colspan="2">주변온도를 낮춘다</td><td>외부간접냉각케이블</td></tr>
<tr><td rowspan="2">케이블을 냉각한다</td><td>외부에서 냉각한다</td><td>외부직접냉각케이블</td></tr>
<tr><td>내부에서 냉각한다</td><td>내부직접냉각케이블, 극저온케이블</td></tr>
<tr><td colspan="2">허용온도를 올린다</td><td colspan="2">내열절연재료를 사용한다</td><td>관로기중송전</td></tr>
<tr><td colspan="2">충전전류를 줄인다</td><td>정전용량을 줄인다</td><td colspan="2">절연재료를 바꾼다</td><td>플라스틱절연케이블, 관로기중송전</td></tr>
</table>

용량은 접속부의 갯수에 따라서 제한되기도 한다. 이 때문에 접속부의 절연두께를 저감하여 열저항을 작게 하는 방식, 열의 대류효과를 추구하는 절연방식, 접속부의 단독냉각방식 등이 개발되고 있다.

다. 충전전류가 송전용량에 미치는 영향

교류케이블계통에서는 충전전류를 보상하지 않는 한 조장이 길어짐에 따라 유효송전용량이 저감된다. 이와 같은 현상은 초고압 이상이 되면 철저해지므로 고려해야 할 필요가 있으며, 충전전류의 보상법으로서는 선로에 리액터를 삽입하는 방법과 진상발전기의 역률운전을 하는 방법이 있다. 이와 같은 충전전류의 문제를 개선한 것이 관로기중케이블이며, 절연구성이 다르기 때문에 충전전류는 유침지 절연케이블에 비해서 정전용량은 동일 송전용량하에서 1/10 이하로 작게 된다.

4. 結言

지중송전선의 대용량화 기술은 발생하는 손실을 저감시키는 방법과 발생하는 열을 냉각시키는 방법으로 나누어 볼 수 있으며, 이와 같은 기술은 전력케이블의 재료나 구조적(설계적)인 개선, 포설조건과 강제냉각 등에 의해서 실용화가 가능하리라고 본다.

최근 용지사정 등에 의한 포설용지의 확보가 어려우므로 외국에서는 가능하면 송전용량을 증대시킬 수 있는 기저온도, 대기온도, 지중온도 등의 효과적인 온도조절 등을 위시한 포설주변조건의 개선에 많은 연구가 진행되고 있다.

또한, 전력케이블의 도체와 절연재료의 개선은 통전에 의한 도체발생손실과 초고압화에 따른 유전체손(에 기인한 전류용량의 감소)을 적극적으로 저감시킴으로써 용량(허용전류)의 증대화가 가능할 것으로 기대되고 있다.

지중송전 대용량화를 위한 새로운 Type의 케이블은 직류케이블, 냉각형케이블, 관로기중선로, 극저온 및 초전도케이블 등이 있다. 이와 같은 케이블의 실용화는 아직 경제성(원/kVA/㎞)이 없어서 계속적인 연구개발 단계에 있으나 머지 않아 지중송전 선로로서 포설될 것으로 기대된다.