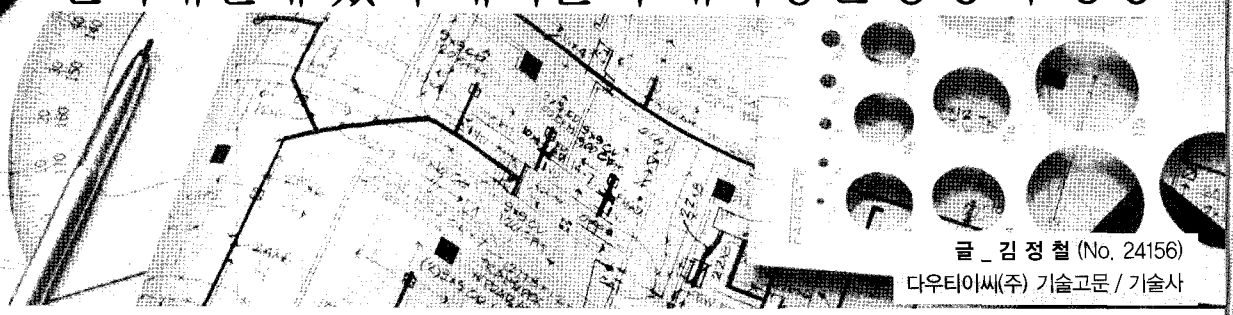
# 전력배전에 있어 케이블의 대지정전 용량의 영향



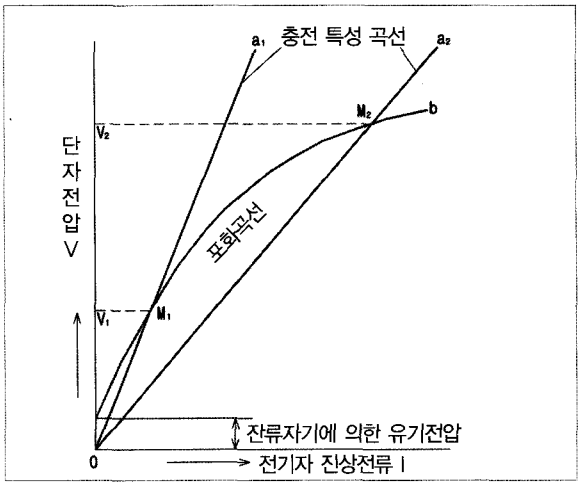
글 _ 김 정 철 (No. 24156)
다우티이씨(주) 기술고문 / 기술사

3.3kV이상의 고압 케이블은 심선을 둘러싼 금속차폐선이 있고 케이블 설치 시에는 이들 차폐선을 대지에 접지함으로 철도의 역간 송전 또는 긴 tunnel등과 같이 긍장이 긴 케이블 선로에서는 대지 커패시턴스에 의한 진상전류로 인하여 전원 변압기의 단자 전압이 상승하고 동시에 전원에 진상 전류가 흐른다. 그러므로 무부하시 선로 충전용량에 비하여 발전 용량이 비교적 작은 자가발전기로 케이블인 배전선로를 충전하면 발전기 전기자반작용으로 발전기의 단자전압이 급격히 상승되어 발전기로 계속 충전할 수 없는 경우가 발생하게 되고 변압기로 케이블 선로를 충전하게 되면 케이블 배전선로가 매우 긴 경우에는 오히려 충전 전류가 감소하게 된다.

## 1. 자기용 발전기로 선로를 충전하는 경우

정전시에 자가용 발전기로 무부하 또는 경부하 선로를 충전하여야하는 경우 발전기의 잔류자기로 인한 전압으로 90° 진상전류가 전기자에 흘러 이 진상 전류로 인한 발전기의 전기자 반작용(전기자 증자작용)으로 발전기 단자전압이 상승하여 운전이 불가능하게 되는 경우가 발생될 수 있다. **그림1**은 선로 충전특성과 발전기의 포화특성과의 관계의 예이다.

그림1에서 곡선 b를 발전기 포화곡선이라 하고 $a_1$과 $a_2$를 선로의 충전특성이라 할 때 선로의 충전전류는 발전기 상 전압에 비하여 90° 진상전류(leading current)이고 발전기 여자전류는 90° 지상전류(lagging current)임으로 2전류의 vector 방향은 서로 반대가 되어 상쇄됨으로 b곡선은 충전용량이 적은 선로 $a_1$과는 $M_1$에서 평형을 이루어 상승된 발전기 단자전압은 $V_1$에서 운전이 가능하게 되나 충전용량이 큰 $a_2$ 선로의



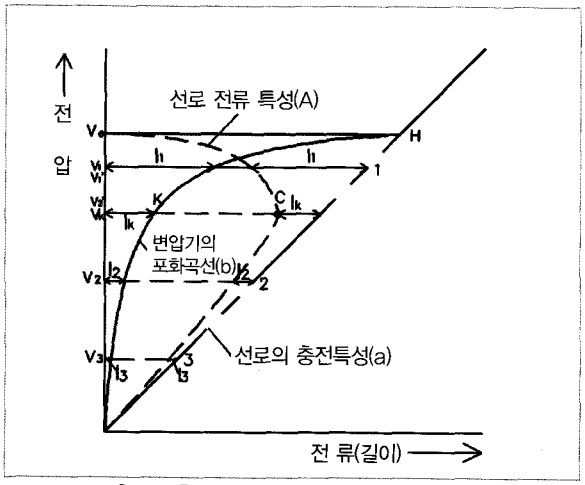

【그림 1】 발전기포화특성과 선로 충전특성의 관계

경우에는 $M_2$에서 평형이 이루어져 발전기 단자전압은 $V_2$까지 상승하게 된다. 따라서 선로의 충전 용량이 발전기에 비하여 큰 경우 발전기 단자 전압 상승으로 충전전류는 다시 증가하게 되고 단자전압 상승으로 운전이 불가능한 상태에 이르게 된다.

## 2. 변압기로 선로를 충전하는 경우

**그림2**는 변압기로 케이블 선로를 충전하는 경우로서 선로의 긍장이 수 km이상에 이르게 되면 저압으로 배전할 수 없음으로 승압변압기를 거쳐서 선로를 충전하든가 한전과의 계약관계로 전압 1:1인 수전용 변압기를 설치하는 경우 변압기의 포화곡선과 선로의 충전전류와의 관계를 설명하는 그림이다. 선로에 흐르는 전류는 선로만의 충전전류(a)는 90° 진상전류

(進相電流- leading current)이고 변압기의 여자전류(b)는 90° 지상전류(遲相電流-lagging current)임으로 2곡선의 차전류(差電流)로 케이블의 충전전류(그림의 a곡선)에서 변압기 포화전류를 차감한 선로전류특성(A)와 같은 전류가 흐르게 되며 이 전류는 진상전류이다. 이와 같은 특성을 보면 선로의 충전전류(a)가 3인 점에서의 전원 변압기 단자전압은 $V_3$, 충전전류가 2인 점에서의 변압기 단자전압은 $V_2$, 또 충전전류가 1인 점에서는 변압기 단자전압은 $V_1$로, 선로의 길이가 증가함에 따라 변압기의 단자전압과 케이블에 흐르는 전류 모두 증가하나 변압기단자전압이 철심의 포화개시전압(knee point voltage) $V_k$보다 높아지면 변압기 여자전류의 증가는 변압기 단자전압보다 훨씬 증가율이 큼으로 케이블에 흐르는 실 전류는 케이블의 충전전류(a)와 변압기 여자전류(b)의 차이만큼 흐르므로 변압기 포화개시 점(K)를 정점으로 케이블에 흐르는 전류는 급격히 감소하여 케이블만의 충전전류(a)와 변압기 포화곡선(b)의 교점 H에서 0이 되나 변압기 단자전압은 $V_e$까지 상승한다. 이와 같은 이유로 같은 규격의 케이블에 있어서도 선로의 길이가 길어지면 대지커패시턴스는 직선적으로 증가하나 케이블에 실제 흐르는 충전전류는 대지커패시턴스에 비례하여 직선적으로 증가하지 않고 케이블만의 충전전류(a)보다는 작게 흐르며 이 작아지는 비율은 케이블길이에 따라 증가하여 정점C를 지나면 선로의 실 충전전류는 급격히 감소하여 0에 이르게되나 변압기 단자전압은 선로전류의 감소에 관계없이 포화곡선에 따라 변압기 포화전압인 $V_e$까지 상승하는 것을 알 수 있다.




【그림 2】 변압기 포화곡선과 선로충전 특성

그러나 실 계통에서 사용 케이블의 길이가 변압기 단자전압을 포화개시 전압까지 상승시킬 만큼 긴 경우는 그리 흔하지 않음으로 케이블 충전 전류가 변압기의 포화개시 전압인 $V_k$에 이르지 않음으로 케이블 충전 전류가 0이 되는 경우는 매우 드물다.

## 3. 전압 상승을 방지하는 방법

### (1) 발전기로 충전하는 경우

발전기로 선로를 충전하는 경우 각 발전기는 발전기 용량과 단락비의 곱에 비례하여 충전 전류를 분담함으로 발전기 2~3대를 병열로 운전하면 안전하게 선로를 충전할 수 있다. 발전기의 단락비 $K_S$라 함은 발전기를 정격속도에서 무부하 정격전압을 유기하는데 필요한 여자전류 $i_{fv}$와 3상 정격단락전류를 흘리는데 필요한 여자전류 $i_{fs}$와의 비로

$$K_S = \frac{i_{fv}}{i_{fs}}$$

를 말하며 단락비가 큰 발전기는 발전기 용량이 같을 때는 기기의 크기가 커지고 철손이 커져서 효율이 나쁘며 가격이 비싸지나 전압 변동률이 적고 과부하 내량이 큰 이점이 있다.

### (2) 선로에 분로 리액터를 설치하는 방법

수전단에 분로 리액터를 설치하여 선로 커패시턴스를 상쇄하는 방법을 고려할 수 있다. 분로 리액터를 설치하면 충전전류는 상쇄되나 선로에 부하가 걸리면 부하의 용량에 따라 리액터의 용량을 줄여야하는 문제가 있다.

## 4. XLPE 케이블의 분로 리액터의 용량 계산

케이블의 충전전류 $I_C$는 선간전압을 V, 선로의 대지커패시턴스를 C [F/km]라고 할 때

$$I_C = 2\pi f \times C \times \frac{V}{\sqrt{3}} = \omega \cdot C \cdot \frac{V}{\sqrt{3}} [A/km]$$

가 된다. 여기서 f는 주파수로 우리나라에서는 f=60Hz임으로 $\omega = 2\pi f \fallingdotseq 377$의 관계가 있다.

따라서 케이블 규격이 정해지면 $I_C$는 선로의 길이에 직선적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 즉 철도 배전선로에서는 XLPE 22.9kV, 60SQ인 케이블을 사용하였는데 한전규격에는 케이블의 대지 커패시턴스 C=0.21[㎌/km]로 되어 있어

선로 전압 22.9kV인 경우 km당 대지충전전류 $I_c$와 3상 분로리액터의 용량 Q는

$$I_c = \omega CE = 377 \times 0.21 \times \frac{22.9}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} = 1.0467[A/km]$$

$$Q = 3 \times \omega \times C \times \left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2 \times 10^{-3} = 41.5175[kVAR/km]$$

로 계산되었다. 그러나 IEC 60287의 대지커패시턴스 계산식에 의하면 d를 케이블 도체외경+반도전층의 두께[mm], D는 절연체의 외경[mm]이라 할 때 한전규격(ES)에 의하면 XLPE 22.9kV, 60SQ의 d=10.5mm, D=24.5mm이고 ε은 가교포리에치렌의 유전율로 IEC에서는 ε=2.5로 되어 있음으로

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \times \ln\frac{D}{d}} = \frac{2.5}{18 \times \ln\frac{24.5}{10.5}} = 0.1639[\mu F/km]$$

가 되어 km당 선로의 충전전류 IC와 완전 보상에 필요한 분로리액터의 3상 용량 Q는 각각

$$I_c = 377 \times 0.1639 \times \frac{22.9}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} = 0.8169[A/km]$$

$$Q = 3 \times 377 \times 0.1639 \times \left(\frac{22.9}{\sqrt{3}}\right)^2 \times 10^{-3} = 32.4035[kVAR/km]$$

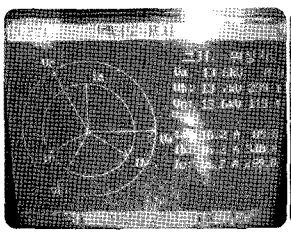
로 계산되어 한전규격에 의한 계산과는 22%가량의 차이가 있었으며 한국철도시설공단 연구원 전기연구팀의 도움으로 철도의 장거리 배전선로 2개소에서 케이블의 대지 충전 전류를 측정하였는데 그 결과는 다음과 같다. 선로는 모두 XLPE 22.9kV 1C-60SQ이었다.

2003. 10. 23 한국철도공사 고속전철 신청주 변전소에서 측정한바 전원변압기 용량 3000kVA, 선로 궁장 30.147km로 A상의 상전압 13512[V], 상전류 22.4[A]로 케이블의 단위길이 당 충전전류 $I_c = \frac{22.4}{30.147}$ 0.743 [A/km] 로 대지 커패시턴는

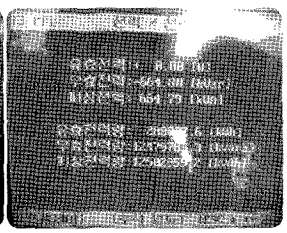
$$C = \frac{0.743 \times 10^6}{377 \times 13512} = 0.1459[\mu F/km]$$ 이었으며 이때의 CT 변류비 100/5A, PT의 변압비 22000/110V였으며 또 2009. 9. 10일 한국철도공사의 왜간전력소에서 측정결과는 전원변압기 용량 1500[kVA], 선로길이 19.3km로서 상전압 13.63kV, 상전류 16.2A로 케이블의 단위길이 당 충전전류 $I_c = \frac{16.2}{19.3}$ = 0.8394 [A/km] 이고 대지 커패시턴스

$$C = \frac{0.8394 \times 10^{-6}}{377 \times 13.63} = 0.1634\ [\mu F/km]$$ 로 IEC의 계산 값 C = 0.1639[μF/km]에 매우 가까웠다.

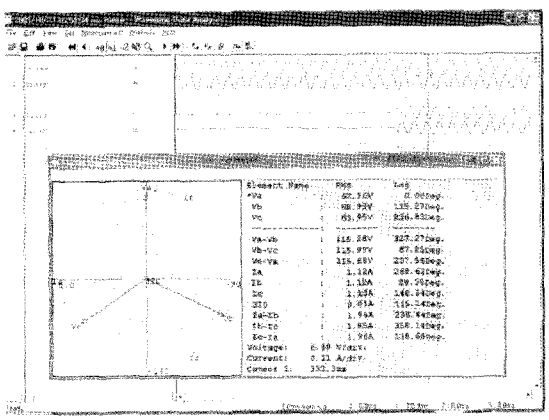
아래의 **그림3-a** 및 **3-b**는 2010. 9. 10일 왜간전력소에서의 측정치로 케이블의 무부하 충전상태를 측정한 값으로 기준 vector를 A상 전압으로 했을 때 전류의 위상각은 진상 90°이고 유효전력은 0[kW]임으로 케이블 선로상수는 C(커패시턴스)뿐임을 알 수 있다. **그림 3-C**는 2003. 10. 23일 신청주에서 케이블의 충전상태를 측정한 결과이다.



【그림3-a】 왜간전력소의 측정치 A-리액터개방상태(케이블의 상전압, 상전류, 전압전류 위상 각)

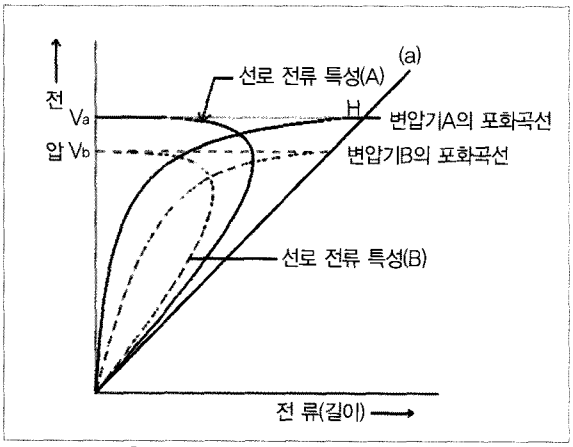


【그림3-b】 왜간전력소의 측정치 B-리액터개방상태(케이블의 소모 전력)

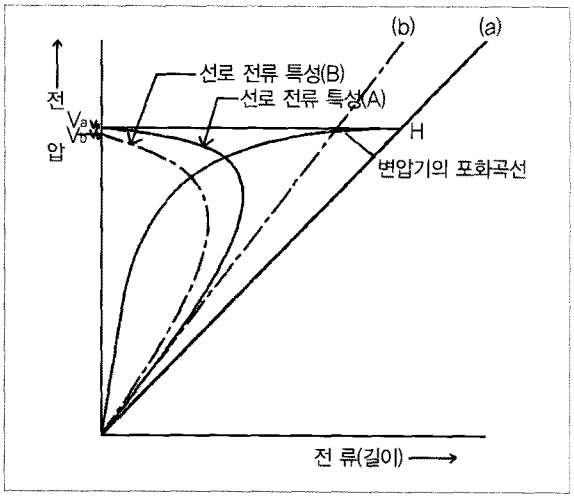


【그림 3-c】 신청주변전소 측정결과(일시 2003.10.23일)

이와 같은 측정 결과를 검토하여 보면 케이블의 실 충전전류의 크기에 영향을 주는 요인은 전원 변압기의 특성과 케이블의 대지 커패시턴스 및 배전 케이블의 길이이다. 즉 **그림 4**와 같이 전원 변압기용량이 변하여 그 포화 특성이 변압기 A에서 용량이 적은 변압기 B로 변했을 경우의 선로 충전전류는 선로전류 특성 (A)에서 선로전류특성 (B)로 변하고 전원 변압기 용량이 변하지 않고 배전 케이블의 굵기만 변했을 경우 즉 **그림 5**와 같이 선로충전특성이 (a)에서 (b)인 선로로 변했을 경우 선로의 충전 전류는 선로전류 특성(A)에서 선로전류 특성(B)로 변한다.



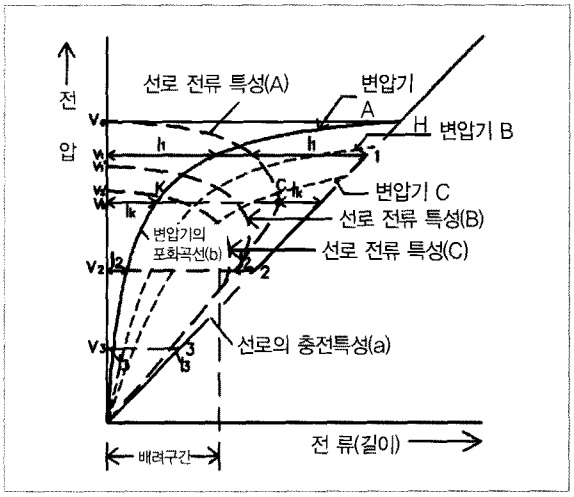

【그림 4】 케이블이 일정하고 변압기 용량만 변했을 때




【그림 5】 변압기 용량이 일정하고 케이블의 굵기만 변했을 때

신청주에서 측정한 대지 커패시턴스 C=0.1459[㎌/km]와 왜간에서 측정한 대지 커패시턴스 C=0.1634[㎌/km]의 차이는 위에서 설명한바와 같이 전원변압기 용량이 서로 다르고 케이블 길이에 차이가 있기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

이와 같이 전원 변압기의 용량과 선로의 굵기에 따라 케이블 충전전류가 변함으로 케이블 충전용량 보상을 위한 분로 리액터의 용량을 보다 정확하게 산정하려고 하면 그림 6과 같이 전원 변압기의 표준용량과 배전 케이블의 굵기의 관계 곡선을 그리고 그림의 X축에서 배전선로인 케이블 길이에 해당하는 충전전류를 찾아서 분로리액터 용량을 계산하는 것이 타당할 것으로 생각된다.




【그림 6】 변압기 용량과 케이블이 충전전류

**그림 6**은 변압기 A, B, C를 각각 용량이 다른 표준변압기 포화특성곡선이라 할 때 예를 들면 변압기 A는 1차 전압 22.9kV 용량 2000kVA, 변압기 B는 1차 전압 22.9kV 용량 1500kVA, 변압기 C는 1차 전압 22.9kV 용량 1000kVA의 포화 특성곡선이라 하고 케이블의 충전특성(a)는 XLPE 22.9kV 60SQ의 충전곡선이라 할 때의 관계곡선의 예이다. 배전용 케이블의 길이는 되도록 케이블에 흐르는 선로 전류특성(그림의 (A),(B),(C)곡선)이 직선에 가까워서 직선인 선로의 충전특성(a)이 서로가 비례식으로 계산하여도 큰 오차가 발생하지 않는 그림6에서 표시한 선로 전류가 linear한 비례구간의 길이를 초과하지 않는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 여기에 전원 변압기의 용량이 다른 변압기 예를 들어 1차 전압 22.9kV, 용량이 750kVA인 변압기의 포화 특성 곡선을 1개 더 추가하고 필요에 따라 케이블 선로의 충전 특성에 XLPE 22.9kV 35SQ인 충전전류의 경우 한 가지를 병열로 더 추가한 변압기와 케이블의 충전특성의 관계 곡선을 만들면 분로리액터 용량계산에 널리 활용할 수 있는 Data sheet가 될 것이다.

## 5. 케이블 선로에 대한 무부하 변압기의 영향

왜간 전기실에서 구미역사이의 케이블선로에 결선되어 있는 변압기는 다음 표와 같다. 이들 변압기가 무부하로 선로에 연결되어 있을 때 왜간 전기실 송전단에서의 역률에 어떤 영향을 미치는 가를 검토하여 보기로 한다.

철도공사 왜간 전기 실에서 구미역사이의 예비선로에 결선되어 있는 변압기

| 수전용 변압기 | 배전용 변압기 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 설치장소 | 규격 | 용량(kVA) | | 사용 용도 |
| | | | 주 | 예비 | |
| 3Ø22.9/22.9kV 1,500kVA X 1 3Ø22.9/6.6kV 1,000kVA X 1 | 구미수전실 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 30 X 1 | 30 X 1 | 신호용 |
| | 사곡전기실 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 50 X 1 | 50 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 사곡터널 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 50 X 1 | 50 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 사곡 SS | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 200 X 1 | 200 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 약목전기실 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 100 X 1 | 100 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 약목전기실 | 1Ø 22.9kV/220V | 75 X 1 | 75 X 1 | 신호용 |
| | 관호건널목 | 1Ø 22.9kV/220V | 50 X 1 | 50 X 1 | 건널목전등, 전열용(운휴상태) |
| | 왜관2터널 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 50 X 1 | 50 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 왜관SSP | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 75 X 1 | 75 X 1 | 전등, 전열용 |
| | 왜관1터널 | 3Ø 22.9kV/380V-220V | 50 X 1 | 50 X 1 | 전등, 전열7용 |

이 변압기들의 무부하시의 유효전류와 무효전류를 계산하여 보면 다음과 같다.

| 변압기 규격(kVA) | 무부하전류(A) | 유효전류(A) | 무효전류(A) |
|---|---|---|---|
| 200×1 | 5.04×0.012 = 0.0605 | 0.0132 | j0.0591 |
| 100×1 | 2.52×0.013=0.0328 | 0.0101 | j0.0312 |
| 75×2 | 1.89×0.013=0.491 | 0.0152 | j0.0467 |
| 50×5 | 1.26×0.013=0.082 | 0.0253 | j0.0780 |
| 30×1 | 0.756×0.013=0.098 | 0.0030 | j0.0932 |
| 730(kVA) | 0.3154(A) | 0.0668(A) | j0.3082(A) |

이 Data는 KR연구원에서 마련한 ABB 변압기의 특성을 기준으로 계산한 값이며, 변압기 용량별 무부하 전류와 무부하시 유효전류와 무효전류는 다음 식에 의하여 계산한 결과이다.

$$I = \frac{\text{변압기 용량}}{\sqrt{3} \times 22.9} \times \%\text{무부하 전류}$$

$$\times \left\{ \cos\left( \tan^{-1} \frac{\%IX}{\%IR} \right) + j\sin\left( \tan^{-1} \frac{\%IX}{\%IR} \right) \right\} = I_R + jI_X[A]$$

여기서 $I_R$은 변압기 무부하 전류 중 유효분이고, IX는 무효분이다. 예를 들면 22.9kV/380V로 용량 200kVA인 변압기의 무부하전류는 1.2%이고 %IR=1.21%, %IX=5.42%인 경우

$$I = \frac{200}{\sqrt{3} \times 22.9} \times 0.012 \times$$

$$\times \left\{ \cos\left( \tan^{-1} \frac{5.42}{1.21} \right) + j\sin\left( \tan^{-1} \frac{5.42}{1.21} \right) \right\}$$

$$= 0.0132 + j0.0591[A]$$ 로 계산된다.

왜간 ⇒ 구미사이의 예비 선로 거리는 19.3km이고 케이블의 대지 커패시턴스 측정결과 C=0.1634[㎌/km]로 대지 충전전류는 $I_C$=16.2A임으로 예비 변압기가 모두 선로에 결선되어 있는 경우라도 변압기 무부하시의 무효전류는 j0.3082[A]이었음으로 선로에 흐르는 전류 I는 I=0.0668+j(16.2-0.3082)=15.982∠89.96°[A]로 그 비율은 1.939[%]가 되어 2% 이상의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있으며 실측 결과도 그 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. ❖

마침 ❖