

# 지중배전선로의 동적 허용용량 평가 기술

이남우\*, 김대경\*\*, 정성환\*\*\*

(\*한전기술연구원 배전연구실 선임연구원

\*\*한국전기연구소 송변전연구실 선임연구원

\*\*\*한국전기연구소 송변전연구실 연구원)

## 1. 머릿말

케이블의 허용전류를 계산하기 위하여 쓰이고 있는 JCS-168D[1] (“전력케이블의 허용전류”) 및 IEC Pub. 287[2] (“Calculation of the continuous current rating of cables 100% load factor”) 규격은 1957년 미국의 Neher 및 Mcgrath (이후 N-M)가 발표한 논문[3] (“The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable System”)에서 제시한 해석적 방법을 근간으로 하여 수정, 보완된 것으로서 이러한 해석적인 허용전류 계산방법은 계산 과정에서 다음과 같은 가정을 사용함으로써 계산이 쉽고 편리한 반면 케이블의 허용전류 계산에 여유가 과다하기 쉽다.

- ① 토양의 열저항을 및 열확산율은 일정하다.
- ② 지표면은 등온이다.
- ③ 케이블은 무한 균일 매질 내부에 있다.

최근에는 도시를 중심으로 부하가 급격히 증가하는데 반해 지하의 여유공간 확보가 점점 어려워짐에 따라 1980년대에 들어 기존 설비의 이용효율을 극대화하는 방향의 연구가 활발해 지고 있다.

케이블의 경우 1960년대부터 컴퓨터가 케이블의 허용전류 계산에 사용됨에 따라 해석적인 방법으로는 계산이 불가능한 복잡하고, 어려운 계산을 빠르게 수행할 수 있게 됨으로써 해석적 방법에서 계산의 편의를 위해 사용하였던 가정들을 보다 현실과

가깝게 모의하여 해석하는 것이 가능하게 되었다 [4]. 즉, 케이블의 열특성 및 주변 매질의 열특성을 정확히 분석하여 FEM등의 수치해석법을 이용하여 열전달 방정식을 계산함으로써 설계 여유를 줄이고 또 기존설비의 이용율을 증대시킬 수 있는 계기가 마련되었다.

이 글에서는 최근에 새로운 케이블의 허용전류 산정법으로 연구가 활발한 동태용량 산정법에 대하여 개략적으로 기술하고자 한다.

## 2. 배전 케이블의 열회로

### 2.1 열회로의 전기적 유사

배전 케이블의 주종을 이루고 있는 22.9KV CNCV 케이블의 열회로의 전기적 유사회로는 그림 1과 같다.

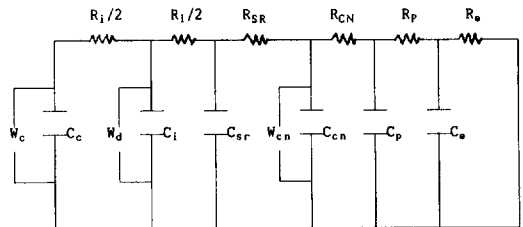


그림 1. 열회로의 전기적 유사 회로(22.9KV, CNCV)

그림 1에서 각 기호는 다음과 같다.

- Wc : 도체손실
- Wd : 절연체손실
- Wcn : 중성선손실
- Ri : 절연체 열저항
- Rsr : 외부 반도체 열저항
- RCN : 중성선 부분 열저항
- Rp : PVC 외장 열저항
- Re : 케이블 외부 열저항
- Cc : 도체 열용량
- Ci : 절연체 열용량
- CSR : 반도체 열용량
- CCN : 중성선 부분 열용량
- Cp : PVC 외장 열용량
- Ce : 케이블 외부 열용량

그림 1과 같은 열회로의 전기적 상사회로에서 열회로의 각 요소와 전기회로의 각 요소의 상사는 표 1과 같다.

표 1 케이블 열회로의 전기적 상사

열 회 로	전 기 회 로
온 도	전 압
열 류	전 류
열 저 항	저 항
열 용 량	콘 덴 서

### 3. 동태 용량(Dynamic Rating)이란?

기존의 JCS-168D 규격 및 IEC Pub. 287 규격을 사용하여 허용전류를 구하는 방법을 동태용량 산정법(Dynamic Rating Method)과 구별하는 용어로서 정태용량 산정법(Static Rating Method)이라고 하며 일반적인 정태용량 산정절차는 그림 2와 같다.

정태 용량 산정은 머릿말에서 언급한 가정들을 근거로 하고 시간  $t = \infty$ 인 상태 즉, 그림 1의 열회로의 전기적 상사회로에서 열용량 부분을 개로상태로 한 후 계산하므로 모든 손실과 열저항만 구해지면 식 (1)과 같이 구해진다.

$$I = \left[ \frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} (1 + Y_c) R_{th}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

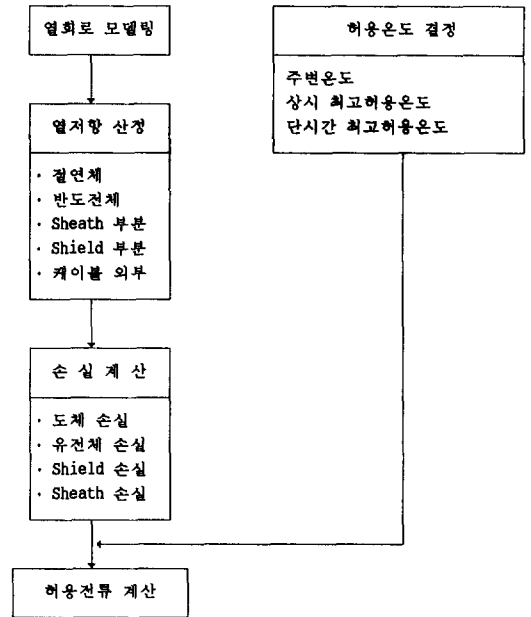


그림 2. 정태용량 산정 절차

- 여기서,  $T_c$  : 최고 도체온도 [°C]
- $T_a$  : 주변 도양온도 [°C]
- $\Delta T_d$  : 유전체 손실에 의한 온도 상승 [°C]
- $R_{dc}$  : 최고도체온도에서의 직류도체 저항 [ $\Omega/m$ ]
- $(1 + Y_c)$  : 교류/직류 도체저항비
- $R_{th}$  : 전체 열저항 [°C-m/W]

위에서 언급한 정태용량 산정법과는 달리 케이블 및 케이블 주변 매질의 열특성을 재평가하고, 또 기상자료, 부하 및 케이블의 표면온도를 실측하여 기상 변화에 따른 부하와 케이블 표면온도 사이의 상관관계를 분석하여 케이블 및 케이블 주변을 구성하고 있는 재료의 열특성 파라미터를 사실과 가깝게 산정함으로써 케이블의 상시허용전류를 증가시킴은 물론 특히 케이블의 과도특성을 이용하여 단시간의 허용전류를 상당히 증가시킴으로써 설계여유가 큰 정태용량 산정법으로 계산한 허용전류보다 높은 전류로 기존의 송배선 선로를 운용하고자 하는 시도를 동태용량 산정법이라고 하며, 이 방법을 사용하여 계산한 허용전류를 동태용량이라고 한다[5].

지중배전선로의 동태 용량 산정 절차는 일반적으로 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는 바와 같이 동태용량 산정 절차는 대략 다음과 같이 4가지 기능으로 구성된다[6].

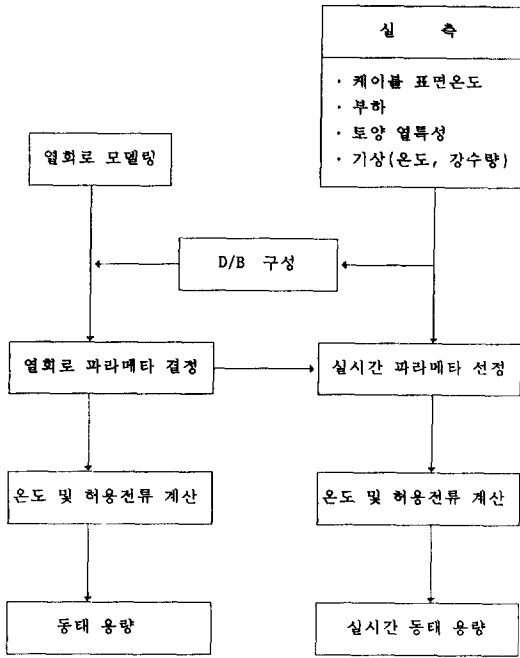


그림 3. 동태용량 선정 절차

- 1) 감시 기능
  - 부하
  - 케이블 표면온도
  - 토양 열저항을
  - 주변온도
  - 기타
- 2) 열특성 파라메타 선정 기능
  - 케이블의 열저항을
  - 토양의 열저항을
  - 기타
- 3) 용량산정 기능
  - 지속시간별 최대 허용전류
- 4) 예측 기능
  - 가상 부하에 따른 도체 및 주변의 온도 예측
  - 열특성 파라메타 변화에 따른 허용전류 예측
  - 주변조건 변화에 따른 허용전류 예측

### 4. 열회로 모델링

동태용량 산정을 위한 케이블의 열회로 모델링 방법으로는 다음과 같은 방법이 있다.

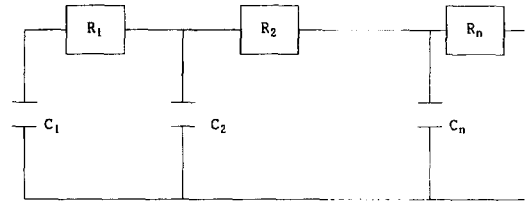


그림 4. Lumped Thermal Network

#### 4.1 Fully Distributed Thermal Network[7]

푸리에 적분법을 사용하여 계산하는 논문에서 볼 수 있는 모델링방법으로써 가공송전선의 분포정수 회로 모델링과 유사한 방법이다. 온도는 시간과 도체표면으로부터의 거리에 대한 함수의 형태로 주어진다.

#### 4.2 Lumped Thermal Network[8]

가장 널리 쓰이고 있는 모델링 방법으로서 그림 4와 같다. 그림 4의 각 Node는 케이블 내부의 각 재료의 경계에 해당되며 각 경계면의 온도는 시간에 대한 함수의 형태로 주어진다.

그림 4에서  $R_n$  및  $C_n$ 은 각각 식(2) 및 식(3)과 같다.

$$R_n = \frac{\rho_n}{2\pi} \log \left\{ \frac{D_n}{D_{n-1}} \right\} \quad [^\circ\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}] \quad (2)$$

여기서,  $\rho_n$ : 재료의 n의 열저항을  $[^\circ\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}]$   
 $D_n$ : 재료의 n의 외경  $[\text{m}]$   
 $D_{n-1}$ : 재료 (n-1)의 외경  $[\text{m}]$

$$C_n = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_{n-1}^2) C_{pn} \quad [\text{J}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}] \quad (3)$$

여기서,  $D_n$ : 재료의 n의 외경  $[\text{m}]$   
 $D_{n-1}$ : 재료 (n-1)의 외경  $[\text{m}]$   
 $C_{pn}$ : 재료 n의 체적비열  $[\text{J}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^3]$

#### 4.3 Two Loops Network[9]

전산기를 이용한 계산에 적합하도록 CIGRE에서 제안한 방법으로써 그림 5와 같이 Lumped Thermal Network의 여러 루프를 두개의 루프로 축약한 모델링 방법이다.

그림 5에서  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $C_A$  및  $C_B$ 는 각각 식(4),

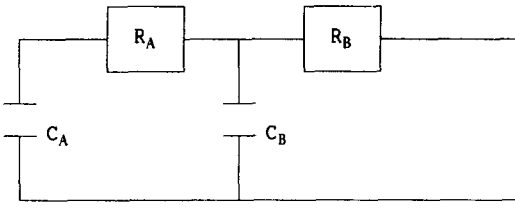


그림 5. Two Loops Network

(5), (6) 및 식(7)과 같다. ( $R_n$  및  $C_n$ 은 그림 4 참조)

$$R_A = R_1 \quad (4)$$

$$R_B = R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (5)$$

$$C_A = C_1 \quad (6)$$

$$C_B = C_2 + \left\{ \frac{T_3 + T_4 + \dots + T_n}{T_2 + T_3 + \dots + T_n} \right\}^2 C_3 + \left\{ \frac{T_4 + T_5 + \dots + T_n}{T_2 + T_3 + \dots + T_n} \right\}^2 C_4 + \dots + \left\{ \frac{T_n}{T_2 + T_3 + \dots + T_n} \right\}^2 C_n \quad (7)$$

Two Loops Network를 이용한 방법은 도체 표면 온도 계산 이외에는 사용할 수 없다.

## 5. 실 측

지중배전선로의 동태용량 산정에 소요되는 열회로의 각 파라메타를 산정하거나 또는 허용전류 계산시에 사용되는 기본조건의 실제값을 사용하기 위하여 실측해야 할 대상은 다음과 같다.

### 5.1 케이블 표면온도

동태용량 산정시에는 도체의 표면온도가 사용된다. 그러나 가공선의 경우에는 도체 표면온도를 직접 측정할 수 있으나 케이블의 경우에는 실측이 불가능하므로 외장의 표면온도를 측정하여 도체의 표면온도를 예측하며 이 예측값을 도체의 표면온도로 사용한다. 일반적으로 매설된 케이블의 표면온도 측정센서로는 센서의 특징 및 경제성을 고려하여 Thermocouple 센서가 주로 쓰이고 있다.

### 5.2 부하

케이블 피더의 부하는 변전소의 RTU 혹은 전력관리처의 SCADA를 통해 얻은 값이나 혹은 Manual Recording 값을 사용한다.

## 5.3 토양의 열특성

토양의 열특성을 측정할 수 있는 방법으로는

- ① 과도 탐침법
- ② 샤논-웰즈법
- ③  $\rho$ -미터법
- ④ 안내 가열판법
- ⑤ Rapid K법
- ⑥ 가열구 매설법
- ⑦ 모의 케이בל법
- ⑧ 간접법 등이 있으나 현장에서 적용이 가능하고 또 비교적 짧은 시간에 정확한 자료를 얻을 수 있고, 한번의 측정으로 열확산율도 동시에 측정이 가능한 과도 탐침법이 가장 널리 사용되고 있다[10].

과도 탐침법을 사용한 측정장비의 개략도는 그림 6과 같으며 과도 탐침법의 측정이론은 다른 논문에서 잘 설명되어 있다[11].

## 5.4 주변조건

동태용량 산정에 필요한 주변조건으로는 토양의 온

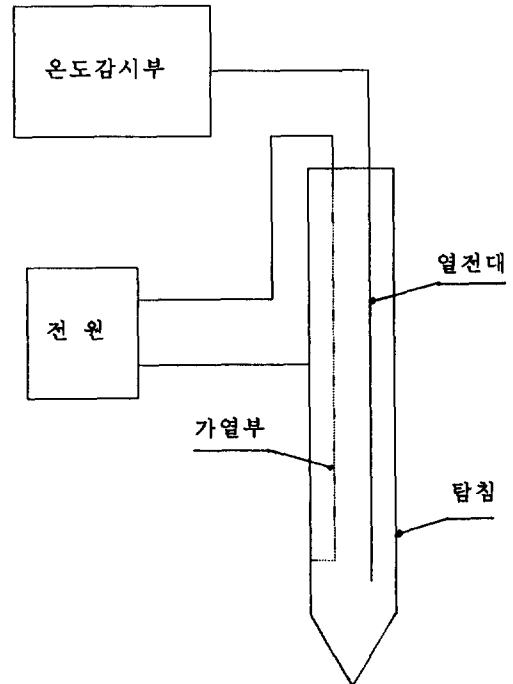


그림 6. 과도 탐침법을 사용한 열저항을 측정장비의 개략도

도, 기온, 강수량 등이 있다. 토양의 온도는 온도센서를 토양 중에 설치하여 측정하고 기타 기온 및 강수량 등의 기상조건은 기상청의 기상자료를 사용한다. 표 2는 마산측후소의 기상자료를 분석한 예를 나타낸 것이다.

**표 2. 마산측후소의 기상자료 분석표**

WEATHER SUB-STATION ID. No. : 155

1. TEMPERATURE AND PRECIPITATION (APRIL, 1990)

YEAR	MONTH	DAY	MEAN T	MAX T	MIN T	PRECI
1990	4	1	13.1	18.8	8.3	0
1990	4	2	16.1	21.2	11.4	0
1990	4	3	12.5	15.0	10.5	12.3
1990	4	4	9.1	13.6	5.5	0
1990	4	5	10.7	17.2	4.5	0
1990	4	6	12.0	19.3	5.2	0
1990	4	7	13.6	16.4	11.2	25.1
1990	4	8	12.8	18.8	7.3	0
1990	4	9	13.7	18.2	6.7	0
1990	4	10	15.2	20.8	11.5	0

1990	4	11	16.3	22.6	9.4	.3
1990	4	12	15.4	17.0	13.8	155.0
1990	4	13	13.1	17.2	8.4	.1
1990	4	14	10.6	15.0	7.5	1.6
1990	4	15	12.3	17.6	7.0	0
1990	4	16	11.6	14.8	9.9	0
1990	4	17	11.2	15.0	8.7	0
1990	4	18	11.1	16.4	8.4	0
1990	4	19	12.3	16.0	7.8	0
1990	4	20	12.0	15.2	9.2	14.8
1990	4	21	15.2	19.7	10.6	0
1990	4	22	12.6	14.2	11.5	21.5
1990	4	23	14.0	19.8	9.0	0
1990	4	24	13.5	19.2	7.1	0
1990	4	25	12.7	17.6	6.2	0
1990	4	26	15.9	21.3	11.4	0
1990	4	27	15.2	20.0	9.8	0
1990	4	28	16.1	19.9	13.0	.3
1990	4	29	17.0	24.2	13.2	0
1990	4	30	15.5	20.8	9.7	0
MEAN (OR MA X, MIN)			13.4	24.2	4.5	77.0

2. MEAN MONTHLY TEMPERATURE

YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MEAN/Y
1985	.1	3.9	7.7	13.2	18.6	20.8	26.5	27.9	23.6	17.4	9.7	1.9	14.3
1986	.4	1.5	7.6	13.9	18.5	21.7	23.6	27.0	21.4	14.9	9.4	6.1	13.8
1987	2.3	4.8	7.9	13.7	18.2	21.6	24.8	25.3	21.5	18.4	11.1	4.9	14.5
1988	3.2	3.1	7.2	13.4	17.9	21.8	24.6	26.7	22.8	18.0	9.8	4.6	14.4
1989	4.5	5.6	8.7	15.1	18.4	20.8	24.8	26.4	22.5	16.7	10.8	6.2	15.0
1990	1.9	7.0	9.8	13.4	18.0	22.4	26.7	28.7	23.3	17.9	13.1	6.2	15.7

RECORD PERIOD : 1985. 1. 1. - 1990. 12. 31.

3. MEAN MONTHLY PRECIPITATION

YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MEAN/Y
1985	.7	18.6	41.4	47.1	109.0	135.3	61.7	174.0	73.6	69.2	28.2	9.9	64.1
1986	.6	13.1	17.0	30.2	47.4	118.0	48.5	60.1	50.6	26.5	3.7	10.8	35.5
1987	16.4	15.8	19.0	34.0	34.4	77.5	144.5	115.5	9.6	25.9	16.4	.0	42.4
1988	7.5	1.2	26.3	37.1	30.5	52.8	71.6	20.7	14.4	1.2	1.1	4.5	22.4
1989	36.6	42.8	32.1	12.7	11.5	101.0	173.1	58.4	80.2	3.5	41.4	3.5	49.7
1990	8.9	35.3	23.7	77.0	49.5	120.0	57.7	16.8	97.4	2.1	18.2	3.5	42.5

RECORD PERIOD : 1985. 1. 1. - 1990. 12. 31.

표 3. 케이블 및 주변매질의 표준 열특성

물 질	열저항을 [°C-m/W]	체적비열 [J/°C-m³]
구 리	0.025	3,450,000
반도체	2.5	2,400,000
절연체	3.5	2,400,000
공 기	38	1,500
PVC(외장)	5.0	1,700,000
흙 관	1.0	1,900,000
PE 파형관	3.5	2,400,000
토 양	1.0	2,000,000

### 6. 열회로 파라메타 산정

Lumped Thermal Network의 각 파라메카는 IEC-853 및 IEC-287에서 추천하는 표준값을 근거로 실측부하 및 실측온도를 해석하여 실제에 가까운 값을 산정한다. 표 3은 IEC에서 추천하는 표준값을 나타낸 것이다.

### 7. 온도 및 허용전류 계산

그림 1과 같은 열회로에서 일단 열회로 파라메타(열저항, 열용량)가 결정되면 온도 및 허용전류는 해석적 방법 및 수치해석법 등을 사용하여 쉽게 계산할 수 있다.

동태 용량 산정의 해석적 방법의 예를 들면 다음과 같다[12].

그림 7과 같은 Lumped Thermal Network에서 절점 a, b 및 c에 관하여 생각해 보자.

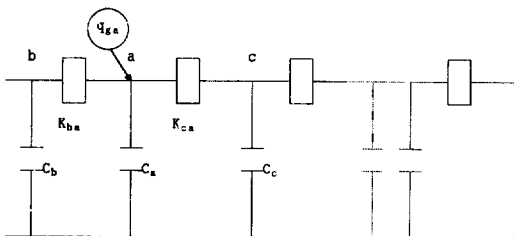


그림 7. 온도계산을 위한 Lumped Thermal Network

절점 a에서 열 입력은

$$K_{ba} (T_b - T_a) + K_{ca} (T_c - T_a) + q_{ga} \quad (8)$$

여기서,  $K_{ba}$ : b에서 a로의 열저항 [W/m-°C]

$T_a$ : 절점 a의 온도 [°C]

$q_{ga}$ : 절점 a의 열 입력 [W/m]

미소 시간  $\Delta t$  동안의 a지점에서의 열류의 평균 변화율은

$$q_a = C_a (T_a' - T_a) / \Delta t \quad [W] \quad (9)$$

여기서,  $C_a$ : 영역 a의 열용량 [J/°C]

$T_a'$ :  $\Delta t$  시간 후의 온도 [°C]

$T_a$ :  $\Delta t$  시간 전의 온도 [°C]

여기서

$$q_a = \sum_{n \neq a} K_{na} (T_n - T_a) + q_{ga} \quad (10)$$

여기서, n: 절점 a 주위의 절점

따라서

$$C_a (T_a' - T_a) / \Delta t = \sum_{n \neq a} K_{na} (T_n - T_a) + Q_{ga} \quad (11)$$

절점 a주위의 b, c에 대하여 풀면

$$\frac{K_{ba} \Delta t}{C_a} T_b + \frac{K_{ca} \Delta t}{C_a} T_c + \frac{q_{ga}}{C_a} \cdot \Delta t -$$

$$\frac{(K_{ba} + K_{ca}) \cdot \Delta t}{C_a} T_a = T_a' - T_a$$

즉,

$$T_a' = \frac{K_{ba} \Delta t}{C_a} T_b + \frac{K_{ca} \Delta t}{C_a} T_c +$$

$$\left[ 1 - \Delta t \left[ \frac{K_{ba} + K_{ca}}{C_a} \right] \right] T_a + \frac{q_{ga} \cdot \Delta t}{C_a} \quad (12)$$

식(12)와 같은 방정식을 절점 마다 세워서 적절한 시간 증분  $\Delta t$ 를 대입하고, 기지의 초기 온도 혹은 정상 상태 해석을 통해 구한 온도를 대입하여 풀면 시간 증분  $\Delta t$ 마다의 새로운 온도를 구할 수 있다. 이때 온도 및  $q_{ga}$  등에 실측을 통해 얻은 일정한 수치를 대입하면 허용전류를 구할 수 있다.

## 8. 맺음말

일반적으로 케이블 계통은 최고허용온도 부근에서 상시운전하는 경우는 거의 없다. 즉, 허용전류 계산시에도 충분한 여유가 있는 가정들을 근거로 계산하므로 허용전류 자체에 충분한 여유가 있을 뿐만 아니라 설계단계에서도 향후 부하의 증가를 고려하여 설계하므로 설계용량 부근에서 상시운전하는 경우는 거의 없다.

동태용량 산정기법은 가상부하에 따른 도체 및 온도의 예측, 열특성 파라메타의 변화에 따른 허용전류의 예측 및 주변조건(기상등)의 변화에 따른 허용전류의 예측이 가능하며 특히 케이블의 과도특성을 이용하여 단시간의 허용전류를 상당히 증대(외국의 경우 정태용량의 약 2배)[13] 시킬 수 있는 장점이 있다.

따라서 정태용량 산정에 의한 설계 여유 및 운전중에 조건의 변화에 따른 허용전류의 여유를 예측 할 수 있는 동태용량 산정법은 케이블 부하조정의 융통성 뿐만 아니라 케이블계통 사고시에도 적절히 대처할 수 있는 많은 융통성을 제공해 주게 된다.

아울러 동태용량 프로그램이 절연체의 수명손실평가법과 함께 해석된다면 케이블계통의 플렉시빌리티와 효율의 비약적인 증가를 가져올 뿐만 아니라 전체 계통의 신뢰도를 증가시킬 수 있는 장점등으로 인해 복잡한 도시에서 새로운 케이블 경과지 확보가 점점 어려워지는 추세에 따라 앞으로 동태용량 프로그램에 관한 연구개발이 활발해질 것으로 예견된다.

## 참 고 문 헌

- [1] JCS-168D, "전력케이블의 허용전류", 일본전선공업회, 1980
- [2] IEC Std. 287, "Calculation of the Continuous Current Ratings of Cables (100% Load Factor)", 1988
- [3] J. H. Neher, M. H. McGrath, "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems", AIEE Trnas. on PAS, pp 752~772, 1957
- [4] H. Goldenberg, "Transient Heating of Buried Power Cables", IEE Proc., Vol. 114, No. 6, pp 809~816, 1967
- [5] P. M. Callahan, D. A. Douglass, "An Experimental Evaluation of a Thermal Line Uprating By Conductor Temperature and Weather Monitoring", IEEE Trans. on PWRD, vol. 3, No. 4, pp 1960, 1988
- [6] R. N. Patton, S. K. Kim, R. Podmore, "Monitoring and Rating of Underground Power Cables", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-98, No. 6, pp 2285, 1979
- [7] A. Bernath, D. B. Olfe, F. Martin, "Short Term Transient Temperature Calculations and Measurements for Underground Power Cables", IEEE Trans., vol. PWRD-1, pp 22~27, 1986
- [8] J. h. Neher, "The Determination of Temperature Transients in Cable Systems by Means of an Analogue Computer", Trans. AIEE, vol. 70, pt 2, pp 1361~1369, 1951
- [9] IEC Std. 853-2, "Calculation of the Cyclic and Emergency Current Rating of Cables", 1989
- [10] "Backfill Materials for Underground Power Cables, phase I", EPRI EL-506, 1977
- [11] J. E. Steinmanis, "Thermal Property Measurements Using a Thermal Probe", Proceedings of the Symposium on Underground Cable Thermal Backfill, 1981
- [12] B. M. Weedy, "Underground Transmission of Electric Power", John Wiley & Sons, pp 95, 1980
- [13] R. J. Nelson, T. F. Brennan, J. S. Engeldardt, "The Application of Real-Time Monitoring and Rating to HPOF Pipe Cable Systems", IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, No. 2, pp 850~856, 1989



**이남우(李南雨)**

1956년 6월 12일생. 1979년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1981년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980. 12 한국전력공사 입사.

1991~현재 한전기술연구원 배전연구실 선임연구원.



**정성환(鄭聖煥)**

1964년 3월 10일생. 1987년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1989년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1989~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 연구원. 1990~현재 한국전기연구소 송변전연구실 연구원.



**김대경(金大景)**

1958년 2월 20일생. 1981년 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1983년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984~1987년 현대엔지니어링 특수사업부 근무. 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 선임연구원. 1990~현재 한국전기연구소 송변전연구실 선임연구원.

1990~현재 한국전기연구소 송변전연구실 선임연구원.